

# 基于声速温度计的乙炔燃烧和爆轰后温度测量

杨乾锁 彭志敏

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室 北京 100190

**摘要:** 基于声速和温度的关系, 在长管容器中, 利用自由振荡激光脉冲点火快速启动乙炔和空气及其乙炔和氧气的燃烧和爆轰。利用远端的压力传感器和辐射探测器, 测量了压力波在管内的往返传播速度。在计算出燃烧后气体的平均分子量和比热比后, 得到了燃烧和爆轰后的平均温度。对于实验结果给予了简单的讨论。

**关键词:** 燃烧, 爆轰, 温度测量

## 0 引言

在不同预混气体的燃烧和爆轰过程中, 温度参数是分析研究其热力学过程的基本参数之一。目前应用比较广泛的温度测量方法可分为接触法和非接触法, 接触法测温是通过传感器与待测物体接触并经过足够长的时间达到平衡而达到测量的目的。常用的接触法测温有热电偶、热电阻传感器, 其测温技术比较成熟, 在温度不太高的情况下应用的非常广泛。而非接触法测温一般均为辐射测温, 它以待测物体的辐射信号作为研究对象, 通过分析辐射信号从而测定待测物体的温度, 特别适合于较高温度的测量, 目前常用的主要有原子谱线相对强度法测温、比色测温、多光谱测温等。接触法的优点在于实验装置简单使, 而缺点在于不能用于快速的实时温度测量; 非接触法尽管有高的时间响应度, 但是可靠性较低, 需要准确确定物体的发射率模型; 数据处理复杂, 且受到标定技术限制。近些年来发展起来的与原子和分子光谱相关的温度测量技术包括激光诱导荧光技术、吸收光谱技术以及拉曼光谱技术。但是这类技术需要复杂昂贵的激光和光学设备。事实上, 对于同一种相同的混合气体, 燃烧或爆轰后的温度测定可以利用一种简单的方法来实现。众所周知, 温度和声波在气体中的传播速度遵循如下关系式:

$$V = \left( \frac{\gamma RT}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

这里,  $V$  和  $M$  分别是燃烧后气体中的声速和平均

分子量,  $\gamma$  和  $T$  是对应的比热比和温度, 而  $R$  是普适气体常数。如果知道了燃烧后气体中的声速和平均分子量及其对应的比热比, 而平均分子量和对应的比热比可以计算传来。这样, 只要测量出气体中的声速, 根据上述公式就可以求出对应的温度值, 因此声速值的测量成为温度测量的关键。另一方面, 近些年来, 俄罗斯研究人员在利用长管型燃烧室开展快速点火和燃烧实验时发现燃烧开始后, 燃烧室内的压力和辐射均具有周期波动的现象[1-6]。这种现象应该对应于燃烧时压力的波动, 而这种波动也会带来辐射的波动, 而波动的传播速度等于气体中的声速。因此测量出波动的的时间周期, 即可求得声波的平均速度, 进而可推断高温气体的温度。这种方法不仅可以测量燃烧后气体的温度, 有可能用来测量爆轰波后高温气体的温度。

本文报道了我们利用一个管型燃烧室, 利用 Nd:YAG 自由振荡激光器发出的激光脉冲和燃烧室一端且在室内的煤靶相互作用, 分别启动了乙炔和空气及其和氧气的燃烧和爆轰[7-8]。利用另一端安装的压力传感器和快速光电探测器测量了压力波在管内往返一周的时间, 进而推算了相关的温度值。实验对不同混合比的预混气体进行了测量, 得到了不同混合比可燃气体燃烧和爆轰后的温度值。实验结果还表明: 温度值和可燃气体的初始压力无关。

## 1 实验装置介绍

实验装置如图 1 所示。一台 Nd:YAG 自由振荡激光器发出的脉冲宽度大约为  $200\mu\text{s}$  的激光脉冲和可燃气体中的煤靶相互作用后, 产生等离子体。

这种等离子体可以快速点燃周围的可燃气体。点火的最小单脉冲能量在 13 mJ 左右, 实验中我们使用的点火能量为 50 mJ。利用一个焦距为 150mm 的透镜将平行的激光光束聚焦在煤靶上。燃烧室是一个直径为 50mm、长度为 1255mm 的圆管。在管的另一端, 一个压力传感器和一个光电探测器连接一台 200M 的数字存储示波器用来分别记录尾端的压力波形和辐射波形。为了检测过程是燃烧还是爆轰, 等距离安装的三个电离探针用来测量燃烧波和爆轰波的速度和电离强度, 如图 1 所示。预混可燃气体的产生是将乙炔和空气及其氧气按所要求的比例分多次注入一个容积大约为 20L 的圆形容器的, 注入后采用摇晃和放置一定的时间使其保持均匀混合。然后, 和上述真空状态的燃烧室联通进行等压充气, 充气完成后关闭开关。可进行点火实验。实验状态分为燃烧状态和爆轰状态。

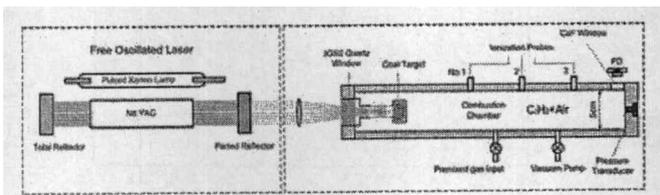
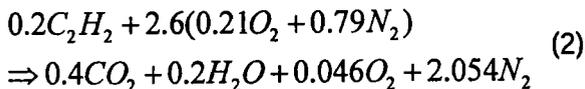


图 1 乙炔和氧气及其空气组成混合气体激光点火测温实验装置图

## 2 实验结果和讨论

在富氧条件下, 我们首先测量了乙炔和空气以 0.2: 2.6 分压比混合的情况下燃烧后的温度值。对应的化学反应式可表示为:



燃烧后气体比热比和热容可以根据下面公式来计算:

$$\gamma = 1 + \frac{R_u / M}{C_p - R_u / M} \quad (3)$$

$$C_p = \sum_i \frac{C_{p,i}}{M_i} \cdot \frac{P_i}{P_T} \quad (4)$$

由此求出燃烧后气体的平均分子量为: 34.74, 对应的 300K 的平均热容为  $1.06877 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ,

对应的比热比  $\gamma$  为 1.28855。在燃烧状态, 3 个电离探针典型的电离强度波形如图 2(a) 所示。这里对应的初始压力为 224KPa。由此可以看到, 电离强度逐步升高。图 2(b) 所示的是尾端的压力波形和辐射波形。可以发现, 在燃烧波到达尾端后, 辐射上升。开始时的压力振荡周期较大(大约为 1.75ms)。随着燃烧波向远端的传播, 振荡周期逐步增加, 当燃烧波到达远端时, 振荡周期在 1.20ms。对应的平均速度如图 3(a) 所示。这里, 在燃烧波到达远端之前, 管内处于一部分混合气体已燃烧, 另一部分没有燃烧, 对应的计算温度是无效的, 只有在燃烧波基本到达远端后, 温度的数值才有效。这时, 压力和辐射出现稳定的等周期同相振荡, 振荡的周期为 1.20ms, 对应的声波速度为 437.5m/sec。

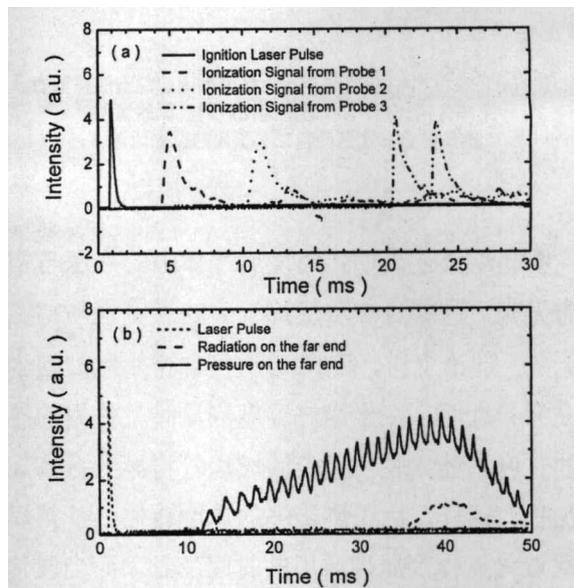


图 2 (a) 典型的 3 个电离探针的信号曲线 (b) 远离点火一端 的压力曲线和辐射波形这里乙炔和空气的比例为 0.2: 2.6, 初始压力为 224KPa

利用等式(1)和 300K 时的比热比, 然后再经过若干次迭代, 既可以得到燃烧后的温度。在迭代过程中, 由于  $C_{p,i}$  是温度的函数, 它的取值应取求出的温度对应的值。这里可以经过 2 步迭代即可得到准确的温度值。首先使用常温下的  $C_{p,i}$ , 然后利用(3)和(4)求出对应的温度值, 然后利用这个温度值下的  $C_{p,i}$  再次求得比热比  $\gamma$ 。再次利用(1)和(3), 求出对应的温度值。再次迭代结果发现, 后两次迭代的温度差只有几度, 即二次迭代后即可定义为所测

的温度值。图 3(b)给出了两次温度计算的结果。在计算过程中，随着温度的升高，比热比下降，根据公式(1)，温度所以会有所上升。

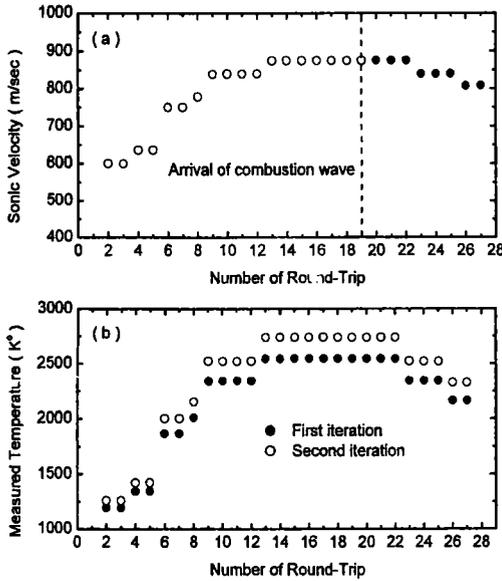
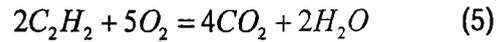


图 3(a) 图 2(b) 中，根据各个压力峰值的间距求出的声波的平均传播速度和 (b) 对应的燃烧后气体的温度。这是经过一次迭代和二次迭代的结果比较。

实验结果还表明：燃烧后气体中的声速与初始压力无关，这就意味着燃烧气体的温度也与初始压力无关。理论上讲，等式(1)不包含初始压力这个参数。另一方面，在做燃烧温度测量时，使用的燃烧管的长度不能太长，过长的燃烧管将导致振荡周期的加长。这样，由于燃烧波的速度较慢，使得燃烧波从点火点传到尾端所用的时间变长，而当波传播到尾端时，点火端的温度已经开始下降，影响测量的精度。实验结果表明：当使用的燃烧室的长度比较长时（例如：这个燃烧室加长到 1225mm 时），得到的声速有所下降，对应的温度值也低。因此在燃烧物温度测量时，不宜使用长度太长的容器。

在研究测量爆轰气体的温度时，由于爆轰波的传播速度远远大于声速，并且为了得到稳定的爆轰波，燃烧室必须具有相当的长度。在我们的实验中，当使用乙炔和氧气的混合气体作为可燃气体时，燃烧室的长度延长到 1225mm，其中第一电离探针和点火点之间的距离被延长。在此基础上，我们研究

测量了乙炔与氧气爆轰后高温气体的温度特征。乙炔和纯氧在化学恰当比情况下的化学反应方程式为：



对应的平均分子量为 35.33。在爆轰状态下，三个电离探针典型的电离信号如图 4(a)所示。由此可以看出，波的速度为 2.45km/sec，从速度上判断为稳态的爆轰。事实上，由于点火点到第一个电离探针有较长的距离(705mm)，上述观测到的稳定爆轰波有可能是 DDT 过程在点火点到第一电离探针间形成的。另一方面，由于爆轰过程强烈的辐射，在点火点附近安装的光电探测器也观测到点火点附近的辐射，这一点不同于图 2(a)所示的燃烧状态时的波形。

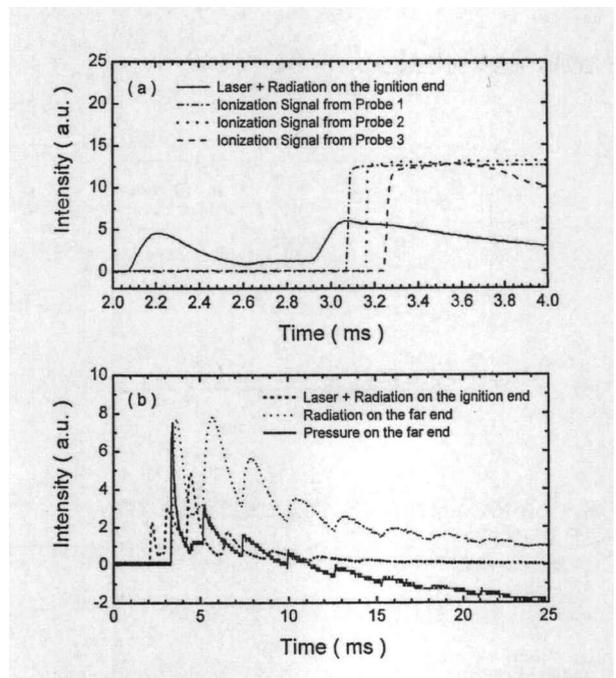


图 4 (a)三个电离探针的信号波形 (b)尾端的压力传感器和光电探测器的波形，这里预混气体是由乙炔和氧气按 1: 2.5 的比例混合而成，初始压力为 60KPa

图 4(b)所示的是点火端的激光的散射和辐射，及其远端的压力和辐射随时间的变化特征。由此可以看出，爆轰和燃烧的压力和辐射波形完全不同。一是压力波和辐射强度的上升是突然的且两者同相，而燃烧状态的上升是缓慢的；二是在爆轰状态下，第一个振荡的周期明显小于后面的周期。其原因在于：爆轰波的速度明显大于当地气体的声速，因此在爆轰波到达燃烧室的远端，没有其它压力波

的到达,因此压力和辐射上升是突然的,另一方面,当爆轰波到达尾端后,反射波的波速尽管小于入射爆轰波速,但是还是大于当地的声速,然后这个反射波逐步减速,接近当地的声速,一次第一个振荡周期要小于后面的周期;对于燃烧来讲,燃烧波的速度远小于当地声波的速度,因此在燃烧波未到达尾端之前,声波在燃烧室内已经往返传播多次。

图 5(b)是前几个往返(不包括爆轰波反射时的那个往返振荡)对应的温度。这里是经过两次迭代的温度数据,和燃烧时的数据处理结果相似,第三次迭代和第二次迭代得到的温度数据只有几度的差别。由此可见,由此可见温度随着爆轰波到达远端以后的时间内,每一个往返传播,温度值发生明显的下降,呈逐渐减小的趋势。相对于燃烧的状态,温度下降的趋势非常明显。而且,随着初始压力的增加,温度有明显的增加,特别是前两个往返过程。

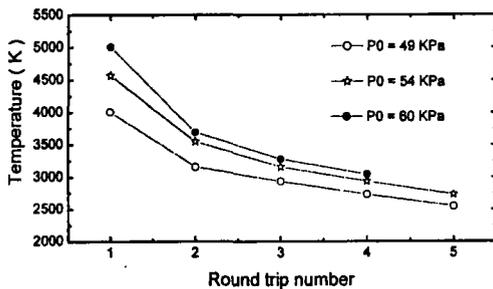


图 5 5 不同初始压力条件下,测量的温度随往返次数的变化情况,这里预混气体是由乙炔和氧气按 1: 2.5 的比例混合而成

综上所述,在长管中的燃烧和爆轰,压力的不均匀会导致压力波在管内的往返传输。利用这种传输周期和对应的燃烧后气体的相关参数,可以估算燃烧后或爆轰后气体的温度值和变化趋势。有上述的实验结果可以看出,为了得到精确的速度值,在时间和幅值上的高精度压力测量和精确的初始压力测量是准确温度测量的关键所在。

#### 参考文献

- [1] Kossyi IA, Silakov VP, Tarasova NM, Wie D van. Long-lived plasmoids generated by surface laser sparks in combustible gas mixtures. *Plasma Physics Reports* 2006;32(4):349-51.
- [2] Kazantsev SYu, Kononov IG, Kossyi IA, Tarasova NM, Firsov KN. Ignition of a combustible gas mixture by a laser spark excited in the reactor volume. *Plasma Physics Reports* 2009;35:251-7.

- [3] Grytsinin SI, Kossyi IA, Misakyan MA, Silakov VP, Tarasova NM, Temchin SM. Features of gaseous mixtures combustion initiated by high-current slipping surface discharge. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 2002; 16(3):450-4.
- [4] Kossyi IA, Silakov VP, Tarasova NM, Taktakishvili MI, Wie D van. Long-lived plasmoids as initiators of combustion of gas mixture. *Plasma Physics Reports* 2004;30(4):375-84.
- [5] Berezhetskaya NK, Grytsinin SI, Kop'ev VA, Kossyi IA, Wie D van. Long-lived plasmoids generated by surface microwave discharges in chemically active gases. *Plasma Physics Reports* 2005;31(10):886-90.
- [6] Berezhetskaya NK, Grytsinin SI, Kop'ev VA, Kossyi IA, Kuleshov PS, Popov NA. Ignition of combustible gas mixture by a high-current electric discharge in a closed volume. *Plasma Physics Reports* 2009;35(6):471-83.
- [7] Yang Qiansuo, Liu Chun, Peng Zhimin, Zhu Naiyi. Laser induced particle jet and its ignition application in premixed combustible gases. *Chinese Physics Letters* 2009; 26(6):065204.
- [8] Qiansuo Yang, Zhimin Peng. Characteristics of plasma induced by interaction of a free-oscillated laser pulse with a coal target in air and combustible gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010;35,4715-4722.