

汽油云雾中不同氧气、氮气含量 对爆轰温度的影响

胡栋* 邓玉良** 孙珠妹*** 李招宁*

(* 成都科技大学应用物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610065)

(** 成都科技大学化工研究所 成都 610065)

(*** 中国工程物理研究院流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

摘 要 本文描述了一种利用多通道高温计测量汽油云雾爆轰瞬态温度的方法。这种方法既适合云雾爆轰辐射充满光纤接收角,又适用辐射部分进入光纤接收角。我们在激波管内,以光纤传输光能,用多通道高温计测量了汽油云雾中氧气、氮气对爆轰温度的影响。研究表明:对于富含汽油的混合物,增加氧含量可使爆轰温度增加;增加氮含量可导致爆轰温度下降,它和利用传感器测量结果吻合。

关键词 云雾爆轰 温度 动态测量

一、引 言

我们知道内燃机中的汽油云雾点火后只能让其燃烧,而不能形成爆轰。爆轰的动态参数对于内燃机的设计和使用又是十分重要的。在内燃机中测量它的爆轰参数比较困难,而测定它的爆轰温度更困难。

温度是描述物质内部分子、原子热运动统计规律的重要参数,是物质状态方程中的基本参量,也是化学反应动力学中的重要参量。对于气相爆轰,爆速和爆压的测量已做了许多工作,但是这种高温、高压、高速、瞬态的极端条件下的温度测量,相对来说还很不够。国内刚开始进行这方面的研究工作^[1-3],而云雾爆轰温度测量的研究就更少。

在动态气体温度测量中,一般利用气体中已有或专门加入的惰性气体辐射和吸收^[4],反应区内中间产物的辐射和吸收^[5]。Cashdollar 通过三个波长(0.8 μm 、0.9 μm 、1 μm)的光谱辐射度得到了粉尘爆轰温度。本文工作是在文献^[1,6]工作的基础上成功地测得汽油云雾爆轰温度,并较好地研究了氧气、氮气对爆轰温度的影响(未见类似的报道)。

二、实验装置及测试原理

利用光学高温计测温时,其基本过程如图1所示。

高温计在波长 λ 处的信号幅度 $V(\lambda)$ 与光源的光谱辐射度满足如下关系:

$$V(\lambda) = ab(\lambda)\epsilon J(\lambda, T) \quad (1)$$

中国工程物理研究院科学基金资助项目。

1991年1月22日收到原稿,5月10日收到修改稿。

式中: $b(\lambda)$ 是定标常数,它包括了光源到记录系统之间的各种与波长相关的因素; a 是由辐射面向光纤端面张的立体角、辐射面等决定的系数; e 和 T 分别是光源的发射率和温度; $J(\lambda, T)$ 是光谱辐射度。

$$J(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} / e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \quad (2)$$

式中: $C_1 = 3.740 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。



图1 测温方框图

Fig. 1 The procedure of temperature measurement

1. Radiation source, 2. Device of photoelectric exchange, 3. Oscilloscope

测量时若选取 n 个工作波长 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$, 拟合关系式(1)则需满足极小值条件:

$$F = \sum_{i=1}^n (ab_i e J_i - V_i)^2 \quad (3)$$

式中: V_i, b_i, J_i 分别为 J_i 对应的信号幅度, 定标常数, 光谱辐射度。

$$ae = \sum_{i=1}^n V_i b_i J_i / \sum_{i=1}^n b_i^2 J_i^2 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n (aeb_i J_i - V_i) = aeb_i J_i \frac{C_2}{\lambda T^2} / [1 - \exp(-\frac{C_2}{\lambda T})] = 0 \quad (5)$$

只需测出各个波长处信号幅度就能确定灰体光源温度, 而不受待测光源是否充满光纤接收角的限制。

高温计定标的信号幅度 $V_0(\lambda)^{[7]}$ 为:

$$V_0(\lambda) = A(\lambda) / [\exp(C_2/\lambda T_0) - 1] = 0 \quad (6)$$

式中 T_0 为黑体炉的温度。根据(1)、(6)式可得:

$$b(\lambda) = A(\lambda) / ae_0 K_0(\lambda) C_1 \lambda^{-5} \quad (7)$$

式中: e_0 和 $K_0(\lambda)$ 分别为黑体炉的发射率和定标时所加透镜的透过率。

$$a = \frac{1}{4} \pi r_0^2 \sin^2 \theta_0 \quad (8)$$

式中: r_0 和 θ_0 分别为光纤的芯径和接收角。 θ_0 与光纤的数值孔径 N_A 有以下关系:

$$\sin \theta_0 = N_A \quad (9)$$

烷、烃燃烧、爆轰反应区中的成份相当复杂。对于贫燃料, 其光谱主要是 OH 基和 CH 基发出的谱线较多且较强, 其谱线分布在 $0.28 \sim 0.342 \mu\text{m}$ 、 $0.39 \mu\text{m}$ 及 $0.4315 \mu\text{m}$ 波长处; 而富燃料的混合物其 C_2 键的谱线比较强, 它们主要出现在接近缘区^[8]。因此, 利用建立在连续辐射基础上的光学高温计测量温度, 选择的工作波长应避开上述较强的谱线。根据我们已有的工作波长, 采用了富燃料混合物为工作介质。此外, 实验已证明^[1], 当测温通道数达到 4 个以后, 再增加通道数对温度的测量精度影响不大。因此我们的测温实验根据需要只选择了表 1 的 4 个工作波长。对同一实验条件, 我们选取了多种组合方式。

我们采用图 1 所示的实验系统测量了汽油(70[#])云雾爆轰温度。爆轰发展为爆轰波

阵面由左向右传播。爆轰辐射通过四根芯径为 $60\mu\text{m}$ 的石英光纤传输给光学高温计。四根石英光纤的端面尽量保持在同一平面上,为了保证各根石英光纤之间能够相互平行,四根光纤通过厚度为 2cm 的橡皮挤紧密封,并固定在激波管壁的传感器安装孔内。为了减少系统误差给实验精度带来的影响,插入激波管内的石英光纤端面每次实验前必须重新处理^[7],并用 He-Ne 激光器进行检查。实验时,光纤引放的态度尽量保持一致。石英光纤将爆轰波后产物发出的光辐射接收,再传输给光学高温计,再将光信号通过光电信增管放大,并转换成电信号后传输给示波器。

表 1 测温波长的有关参数^[7]

Table 1 The related parameters of six channels for the pyrometer

No.	1	2	3	4	5	6
波长/ (μm)	0.4064	0.540	0.636	0.690	0.835	0.930
半宽度/ (μm)	0.0068		0.0075		0.02	0.018
定标常数 $A(\lambda)/(\text{mV})$	4.526 $\times 10^6$	1.178 $\times 10^6$	4.254 $\times 10^6$	1.209 $\times 10^6$	2.282 $\times 10^4$	4.547 $\times 10^4$
定标常数 $b(\lambda)/(\text{mV})$	6.141 $\times 10^6$	1.397 $\times 10^6$	5.028 $\times 10^6$	1.458 $\times 10^6$	2.885 $\times 10^4$	5.889 $\times 10^4$

可靠地触发示波器是取得实验信号的关键因素之一。在部分实验中,离温度测试点 50cm 处我们用塑料光纤引出光辐射,并通过 3DV_{12} 红外光电管及运算放大器后输出电信号来触发示波器。对于光辐射软弱的实验,我们采用压通式的触发探针。我们知道在动高压测量中,示波器等记录系统的触发多数采用铜箔电离式或压通式(火线与地线之间加绝缘介质),这种触发形式已不能在本实验的低压系统中使用。我们选用了机械压合式的探针,两层铜箔之间用一层透明胶纸隔开,根据铜箔宽度选择胶纸间的空隙。实验前必须反复做静止实验,以致很弱的压力就能把触发探针压通,即是胶纸的最佳空隙。做静止实验时,如发现无论怎么试验都不能触发示波器时,则表明触发探针已短路。采用上述触发方式后实验中都能可靠地取得信号。

实验中,石英光纤除放置在平行于爆轰波阵面传播方向进行爆轰温度测量外,石英光纤还在垂直爆轰波阵面传播方向进行测量。

三、实验结果及分析

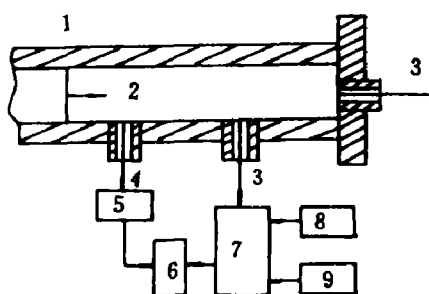
利用图 2 所示的实验装置我们分别测量了汽油云雾混合物中氧气、氮气对汽油云雾爆轰温度的影响。

1. 氧气对汽油云雾爆轰温度的影响

为了能使汽油云雾保持富燃料的状态,每次实验中我们加入 25 毫升的 70° 汽油,氧气含量分别为 0.015MPa 、 0.0175MPa 、 0.02MPa 、 0.025MPa 、 0.03MPa 。测量的典型实验结果列于图 3 中。

图3(a)给出的是汽油云雾混合物中氧气初始压力为 $p_{O_2} = 0.02\text{MPa}$ 时垂直于爆轰波阵面传播方向测得的光幅射信号。示波器触发到信号出现的时间为 $160\mu\text{s}$, 它和压力传感器测得的速度 $u_f = 3.4\text{km/s}$ 算得的时间相符。它也是爆轰波从光、电触发到进入测温光纤接收角的时间。由于爆轰波阵面后产物充满光纤接收角, 故出现一个峰值信号。根据四个波长记录到的幅度, 利用(4)、(5)式及温高计标定的结果, 即能算出汽油云雾爆轰的温度。

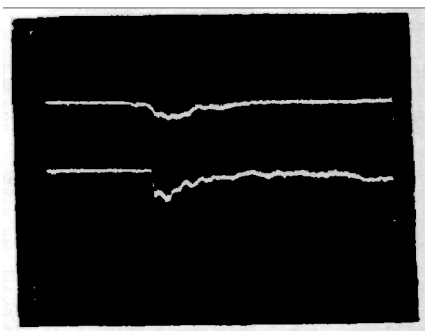
图2 测温装置示意图



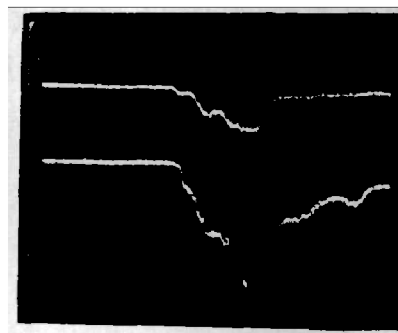
- 1. 爆炸激波管, 2. 爆轰波阵面, 3. 石英光纤,
- 4. 触发管, 5. 红外探测器, 6. 示波器,
- 7. 光学高温计, 8. 低压电源, 9. 高压电源

Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement for temperature measurement

- 1. Explosion shock tube, 2. Detonation front,
- 3. Quartz fibres,
- 4. Trigger, 5. ultraviolet detector, 6—Oscilloscope,
- 7. Optical pyrometer, 8. Low voltage power supply,
- 9. High voltage power supply



(a)



(b)

图3 汽油(70%)云雾爆轰温度测量的典型结果

(a) 垂直于波阵面传播方向测量结果

$$p_{O_2} = 0.02\text{MPa}$$

灵敏度: 50mV/div , 扫程: $50\mu\text{s/div}$

(b) 平行于波阵面传播方向测量结果

$$p_{O_2} = 0.0175\text{MPa}$$

灵敏度: 50mV/div , 扫程: $50\mu\text{s/div}$

Fig. 3 Typical results of detonation temperature for gasoline (70%) spray.

(a) Typical result of the experiment in which fibres were vertical to the direction of detonation wave

Vertical, 50mV/div ,

Time sweep, $50\mu\text{s/div}$

(b) Typical result of the experiment in which fibres were parallel to the direction of detonation wave

Vertical, 50mV/div ,

Time sweep, $50\mu\text{s/div}$

图3(b)列出了沿着爆轰波方向测得 $p_{O_2} = 0.0175\text{MPa}$ 汽油云雾爆轰光幅射信号。从示

波器被触发起,照例应有信号出现,但是我们的实验中此讯号不明显。这可能是光辐射被汽油云雾吸收所致。随着爆轰波向右传播,当接近光纤接收端面时,光纤的接收角被充满,信号达到一个稳定值。利用这个值同样也能算出温度值。按上述两种方法确定的汽油云雾爆轰温度测量误差均在 10% 左右。在测量误差范围内,这两种测量方法确定的温度值都能表示为汽油云雾温度。

为了观察爆轰波阵面后产物流动的温度变化过程,我们选取了一发实验,每次利用同一时刻的四个信号幅度,确定一个温度值,即可得到汽油云雾爆轰温度随时间的变化过程(参见图 4)。由图 4 可见,当爆轰波的光辐射充满光纤的接收角以后计算出的温度值偏离都不是很大,它小于拟合误差。这样给确定云雾爆轰温度带来了方便。

图 5 列出了富燃料条件下汽油云雾爆轰温度和氧含量的关系。由图 5 可以清楚地看出,当氧的初始压力 p_{O_2} 增加后,汽油云雾爆轰温度稍有增加。这也说明了汽油云雾混合物中汽油尚未充分燃烧。

我们知道汽油中含有上百种烃、烷,详细写出它们的化学反应方程式十分困难,要确定它的化学当量浓度更困难。但是从我们的温度测量中可以近似看出,当 p_{O_2} 为 0.025MPa 后温度增加不太明显。我们近似把此值作为它的化学当量浓度,显然这个值偏小。Strehlow R.A. 等人^[9]的实验研究已表明,只有当液滴的尺寸小于 0.1mm 后,液滴即能全部汽化参加反应。但是多数情况下全部液滴汽化参加反应是较少的,故化学当量浓度偏大(指燃料,下同)也是和实际情况相符的。章冠人等人^[9]的结果已表明了用测得的爆速变化确定正庚烷云雾爆轰的当量浓度比按化学反应方程式确定的当量浓度大,这个结果和用温度变化确定当量浓度相吻合。

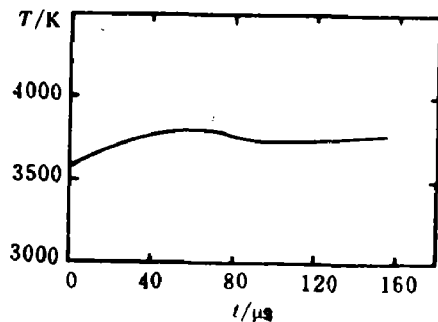


图 4 汽油云雾爆轰温度随时间的变化
Fig. 4 History of the detonation temperature
for gasoline spray

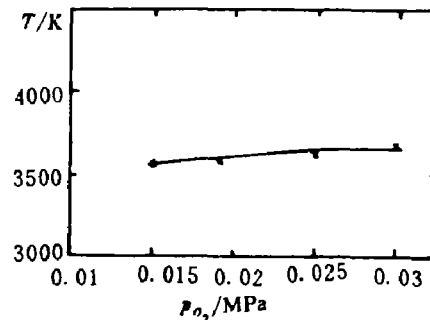


图 5 氧气对汽油云雾爆轰温度的影响
Fig. 5 The influence of oxygen in the gasoline
spray on detonation temperature

2. 氮气对汽油云雾爆轰温度的影响

胡栋等人^[10]的研究已经表明,加大汽油云雾中的氮化含量能够使汽油云雾燃烧转变为爆轰的过程加长,并能减弱爆轰压力和爆轰速度。而爆轰温度对内燃机的设计和使用也是十分重要的依据之一。为此我们在汽油(70%)、氧($p_{O_2}=0.0175\text{MPa}$)混合物中分别充入 0.0025MPa、0.0065MPa、0.0155MPa 氮气,然后也利用图 2 所示的实验装置测量它的云

雾爆轰温度,实验结果列于图6中。为了便于比较,图中也列出了不充氮气时汽油云雾

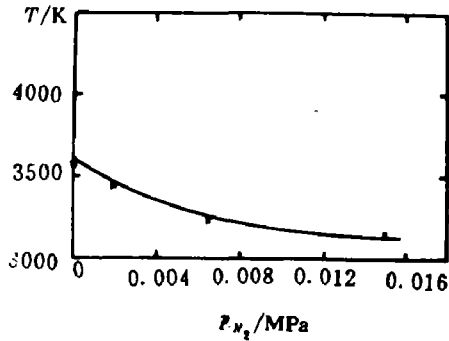


图6 氮气对汽油云雾爆轰温度的影响

Fig. 6 The influence of nitrogen in the gasoline spray on detonation temperature

($p_{O_2}=0.0175\text{MPa}$)爆轰温度。由图6可见,随着氮含量的增加,云雾爆轰的温度有较明显减少。我们知道,无论是用相干反斯托克斯拉曼光谱法,还是瞬时激光拉曼法、谱线相对强度法以及本文所用的 Planck 光辐射原理进行温度测量都必须满足:能量传输弛豫(气体平动能与所有分子或原子的振动能、转动能、电子能量相互转化)完成后,所得到的振动温度,转动温度及电子激发温度等才会与爆轰气体一致。在汽油与氧反应过程中只有少量的氮参加化学反应,这样大部分氮作为惰性气体存在于反应产物中。而云雾爆轰波的胞格结构明显大于相同初始压力下气体爆轰波

的胞格结构,也就是说云雾爆轰波反应周期(俗称反应区宽度)比较长。这样爆轰产物中的各种原子、分子、自由基、化合物有足够的时间进行能量交换。大量的氮存在于爆轰产物中必定将吸收化学反应释放的能量,以致云雾爆轰的温度下降。当氧和氮的比例为1:1时,云雾爆轰温度约下降20%。温度有这么大幅度的下降对于内燃机来说是相当可观的。本文结果和文献[11]测量结果相吻合的。

四、结 论

本文利用光学高温计测量了氧气、氮气对汽油云雾爆轰温度的影响,研究结果表明:

- 利用光学高温计可以测量汽油云雾动态爆轰温度,精度为10%左右。
- 垂直于爆轰波传播方向及平行于爆轰波传播方向测得的云雾爆轰温度在实验测试精度范围内是相近的,故实验中不一定局限于平行于爆轰波传播方向来进行测量,这为研究爆燃转变为爆轰的研究提供了方便。
- 在富燃料汽油云雾中,如果增加氧的含量可以提高云雾爆轰的温度,我们近似把爆轰温度趋于稳定时的氧含量作为汽油云雾化学当量浓度时的氧含量。
- 增加氮气的含量可以较明显降低汽油云雾爆轰的温度,这对于改善汽油的抗爆轰特性是十分有利的。

本文的工作是在经福谦教授、苟清泉教授指导下完成的,在此深表谢意!

参 考 文 献

- [1] 李招宁,胡栋,孙珠妹,王贵朝. 高压物理学报,1990,4(4),276~283
- [2] 韩成邦,史慧生,廉淑芳. 爆炸与冲击,1988,8(3),255~285
- [3] 高文,王贵朝,章冠人. 爆炸与冲击,1989,9(3),239~243
- [4] Terao K, Jpn J Appl Phys, 1984, 23(1), 27
- [5] Tsuboi T. In: Proceedings of 13th Symp on Shock Tubes and Wave, edited by Charles E T, et al. State University of New York Press. Albany 1982, 145

- [6] Cashdollar K L. *Applied Optics*, 1979, 18(15), 2595
[7] 王贵朝等人. *高压物理学报*, 1988, 2(3), 277~284
[8] Fairbairn A R, et al. *Proc Roy soc*, 1957, 239, 464
[9] Strehlow R A, et al. *Astronautics*, 1970, 15(1), 345
[10] 章冠人, 胡栋, 林其文等人. *爆炸与冲击*, 1991, 11(2), 117~126
[11] 胡栋, 李招宁, 孙珠妹. *内燃机学报*, 待发表

THE INFLUENCE OF OXYGEN (OR NITROGEN) IN THE GASOLINE SPRAY ON THE DETONATION TEMPERATURE

Hu Dong* Deng Yuliang** Sun Zhumei*** Li Zhaoning*

(* *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,*

Institute of Applied Physics, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610065)

(** *Institute of Chemical Industry, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610003)*

(*** *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,*

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

ABSTRACT A multi-wavelength pyrometer technique that can be used to measure instantaneous detonation temperature for gasoline spray is described in this paper with the entire field of view of the receiving fibres either filled by gas or not. The influence of oxygen (or nitrogen) in gasoline spray on the detonation temperature is measured using a multi-wavelength pyrometer with quartz fibres. The results show that the detonation temperature for gasoline spray increases with the increase of oxygen and decreases with the increase of nitrogen. It coincides with the results of measurement using quartz gauges.

KEY WORDS spray detonation, temperature, dynamic measurement