

激波聚焦引燃可燃混合气体的实验研究*

王 春¹, 韩肇元¹, 司徒明²

(1. 中国科技大学 力学与机械工程系, 安徽 合肥 230027; 2. 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 在 94mm × 94mm 方截面激波管上, 入射激波马赫数为 1.60 ~ 1.95 内开展了汽油/空气可燃混合气体在激波聚焦方式下的点火实验。当汽油/空气混合比处于化学恰当比附近, 激波马赫数为 1.69 ~ 1.95 的激波聚焦能够成功地引燃汽油/空气的可燃混合气体, 而当入射激波马赫数低于 1.69 时, 同样条件下的汽油/空气混合气体不能被点燃。流场的纹影照片显示, 与未燃状态相比, 汽油/空气可燃混合气体被引燃后的反射激波波面变宽。

关键词: 激波聚焦⁺; 可燃气体; 点火试验

中图分类号: V231.24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 01-0078-04

Experimental investigation on ignition of combustible mixture by shock focusing

WANG Chun¹, HAN Zhao-yuan¹, SITU Ming²

(1. Dept. of Modern Mechanics, China Univ. of Science and Technology, Hefei 230027, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: Experiments were conducted in a 94mm × 94mm rectangular-cross-section shock tube to investigate the characteristics of ignition of combustible mixture by shock focusing with the incident shock Mach number range 1.60 ~ 1.95. The results show that combustible mixture of gasoline/air can be ignited by this type of shock focusing in the incident shock Mach number range 1.69 ~ 1.95, if gasoline/air mixture is near chemical stoichiometric ratio. When the incident Mach number is below 1.69, the gasoline/air mixture cannot be ignited with the same conditions. Compared with the cases of non-combustion, thicker front of reflected shock can be observed on the Schlieren photos in the case of combustion.

Key words: Shock focusing⁺; Combustible gas; Ignition test

1 引 言

CHAN C K 等人最早进行了激波引燃可燃混合气体的研究。通过在激波管中设置斜坡形障碍物, 在流场中形成激波的反射、绕射和聚焦, 导致局部高温区, 引燃氢气和氧气的可燃混合气体^[1]。当入射激波很强时, 可以观察的氢气/氧气混合气体的爆轰形成。但是, 试验中流场结构较复杂, 混合气体引燃不只是激波聚焦的原因。

明确提出应用激波聚焦来引燃可燃混合气体的燃烧归功于德国亚琛理工大学激波实验室和俄罗斯化学物理研究所联合开展的一项研究。他们采用了若干结构型式, 研究了氢气/空气(氧气)混合气体在

激波聚焦方式下的点火特性, 并观察到了氢气/空气(氧气)的爆燃和爆轰^[2,3]。

众所周知, 常规液体碳氢燃料在民用或军事应用上, 具有非常重要的意义, 如目前备受关注的超燃冲压发动机和脉冲爆轰发动机^[4,5]。但是, 其在激波聚焦方式下的点火研究, 目前尚未见到有关报道。本文采用汽油为燃料, 使其低压挥发后与空气充分混合, 再利用激波在内楔空腔中形成聚焦, 来引燃汽油/空气的可燃混合气体。

2 试验模型

实验方案见图 1, 试验设备采用内部尺寸 94mm × 94mm 方截面激波管, 高压驱动段长 2m, 充入高压

* 收稿日期: 2003-01-25; 修订日期: 2003-05-25。基金项目: 国家自然科学基金 (10072061)。

作者简介: 王 春 (1975—), 男, 博士生, 研究领域为流体力学及宇航推进系统与理论。

氮气, 低压段长 9m, 试验段长 1m, 高压段与低压段之间用 0.4mm 厚的铝膜隔开, 试验段与低压段直接相连。在试验段设置了两个压力测点, 安装有压电晶体传感器, 可以监测入射激波和反射激波的压力信号。

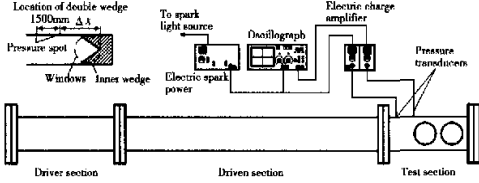


Fig.1 Experimental facility for ignition of combustible mixture by shock focusing

开始试验时, 将低压段和试验段抽低压 (可达 0.005MPa), 再充入定量的汽油, 由于压力很低, 汽油很容易挥发, 一定时间汽油即充分汽化, 然后向低压段和试验段充入空气至所需的压力。充气后等待约 4 ~ 5min 以使汽油蒸汽与空气尽可能混合良好^[6]。

高压段的驱动气体为氮气, 破膜压力控制为 1.1MPa, 破膜后, 激波管内将形成运动激波, 向试验段方向前进。两个压力测点的压力信号经过电荷放大器放大后送往示波器, 对数据纪录后可计算出入射激波速度和马赫数。同时电荷放大器出来的信号引向火花光源, 经过一定的时间延迟后触发高压火花电源, 提供纹影照相系统 (见图 2) 所需的高压脉冲。

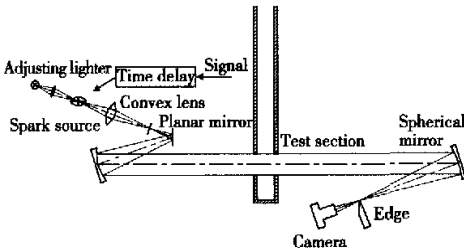


Fig.2 Schlieren optical system

试验段采用内楔空腔激波聚焦方式, 内楔角 70°, 此内楔角情况下, 入射激波向前运动时, 将在壁面和中心线上形成马赫反射, 激波在向楔顶前进的过程中, 激波不断被加强, 最后形成激波聚焦, 如图 3 所示。

3 试验结果与讨论

图 4 显示了激波管运行的入射激波马赫数与低压段压力的变化关系, 各次试验中, 高压驱动段的压

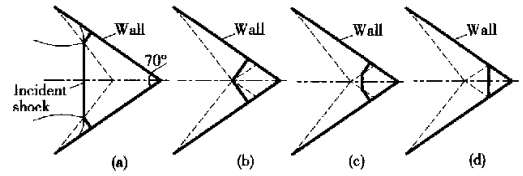


Fig.3 Shock focusing in an inner wedge

力都在 1.1MPa 附近。随着试验段压力的提高, 试验的入射激波马赫数逐渐降低, 试验段压力在 0.003 ~ 0.10MPa 内变化时, 试验的入射激波马赫数可在 2.35 ~ 1.50 之间变化。考虑燃料的吸入和雾化等因素, 选择马赫数在 1.60 ~ 1.95 之间。

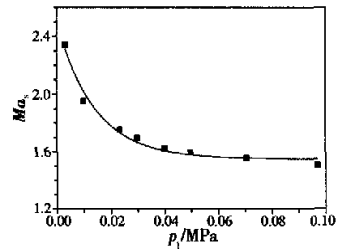


Fig.4 Incident shock mach number vs. pressure of driven section

表 1 给出了在各试验段初始压力下, 激波聚焦引燃可燃混合气体的试验结果。表中 Ma_s 为试验测得的入射激波马赫数, p_4 和 p_1 分别为激波管驱动段和被驱动段的压力 (等于试验段压力), p_2 和 T_2 为入射激波后区域 (即激波管 2 区) 的压力和温度, ϕ 为实验的油气当量比, 即实际油量与理论所需的油量之比。由表中可知, 在高压驱动段压力 1.1MPa 左右的条件下, 能够实现可燃混合气体引燃的入射激波马赫数为 1.69 ~ 1.95, 对应的低压被驱动段压力在 0.01 ~ 0.03MPa 之间。

Table 1 Parameters of experiments and results^{*}

No.	Ma_s	p_4 / MPa	p_1 / MPa	p_2 / MPa	T_2 / K	Result
1	1.95	1.05	0.0099	0.0430	494.9	Ignited
2	1.76	1.05	0.0234	0.0814	449.9	Ignited
3	1.69	1.10	0.0300	0.0972	437.1	Ignited
4	1.62	1.10	0.0401	0.1179	421.0	Non-ignited
5	1.60	1.10	0.0497	0.1413	415.6	Non-ignited

* Experiments were conducted in the range of equivalent ratio $\phi = 0.7 \sim 1.4$.

图 5 显示了部分试验的纹影照片。其中图 5(a)

为试验段无燃料时的流场纹影照片,实验条件为 $p_1 \approx 0.02\text{MPa}$, $Ma_1 \approx 1.76$ 。图 5(b)为激波聚焦引燃可燃混合气体后的流场纹影照片。实验条件为 $p_1 \approx 0.02\text{MPa}$, $M_1 \approx 1.76$, $\phi \approx 0.7$,即表 1 中 No.2 的试验条件。图中 Δx 为楔块顶角位置(见图 1), t_{deflag} 为自激波管压力点 2 压力信号算起的火花光源延迟时间。

图 5(a1)为激波刚进入内楔空腔的流场图像,可以看到,初始激波进入内楔空腔后,在壁面上发生了马赫反射,壁面上有马赫杆出现,激波波面的中间部分由于还没有受到扰动,维持平面形状,激波马赫数不变。图 5(a2)为激波前沿已经到达楔顶并从楔顶刚刚反射时的流动图像,表现为激波前沿后面壁面绕射波的相互作用。之后,楔顶反射激波将自右向左方向传播,并逐渐追赶原壁面绕射波,如图 5(a3)和图 5(a4)所示。总的来说,在无燃料着火的情况下,入射激波和反射激波的厚度很窄,激波比较清晰,因而可以清楚地看到激波进入内楔空腔后,发生激波绕射和反射的图像,波后的流场相对较为干净。

当试验段中充有汽油/空气的混合气体,在入射激波运动一定距离范围内,波后温度不足以引燃可燃混合气体,因而图 5(b)中仅显示了激波于楔顶反射后可燃混合气体被引燃的流场。同时,由于燃料着火后,有强烈的自发光效应,特别位于楔顶附近的流场,难以进行流场的纹影照相。为解决此问题,试验中调整了楔块的位置,即楔块向右移动了 50mm(相对于图 5(a1)),因而图 5(b)中的流场图像为内楔空腔外部

的流场,这里的燃烧强度已大大地减弱了。从试验照片可以看出,燃烧发生后的流场仍表现为反射激波与壁面绕射波的相互作用。与冷态流场不同的是,着火后,反射激波的厚度变宽,这种激波厚度的变宽可能是由于燃料发生化学反应后释放出热量,产生了很强的扰动,而对激波波面产生了影响。值得注意的是,此时,波前的气流实际上是激波管入射激波波后 2 区的气流,即具有一定的速度并被激波加热过的空气与可燃汽油蒸汽的混合气体,这样的加热作用有利于可燃混合气体的点火。从以上结果可以看出,入射激波进入内楔空腔后,形成的激波聚焦能够成功地引燃汽油/空气可燃混合气体。

4 内楔空间激波聚焦的激波动力学分析

平面激波进入内楔空腔之后,如果在壁面上发生马赫反射,则当平面激波向楔顶方向运动时,将形成激波聚焦。这种平面激波的聚焦,可以认为是激波向前运动时,交替受到壁面和中心线上的 shock-shock 扰动,前沿激波的激波强度不断加强的过程。通过激波动力学 shock-shock 关系式,可以计算出此聚焦过程中温度和压力的变化关系。图 6 显示了激波在楔表面绕射时的 shock-shock 作用机制和前沿激波被加强的机理。理论上,激波前沿到达楔顶之前,可以受到 shock-shock 无数次扰动,因而楔顶的聚焦温度理论上是一个无穷大,但是,可燃混合物的点燃不单是温度的作用,还要考虑高温区域的空间尺度。

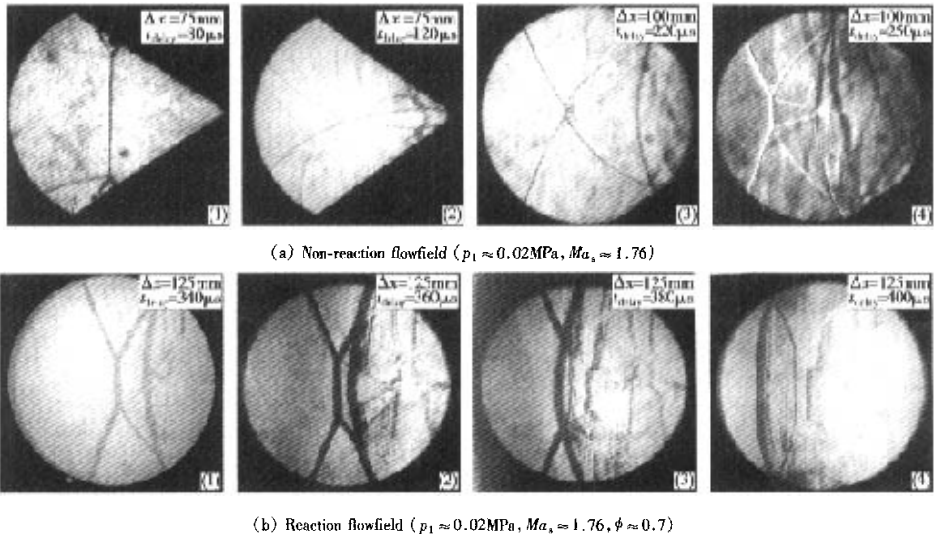


Fig.5 Schlieren photos of flowfield of shock focusing for non-reaction and reaction

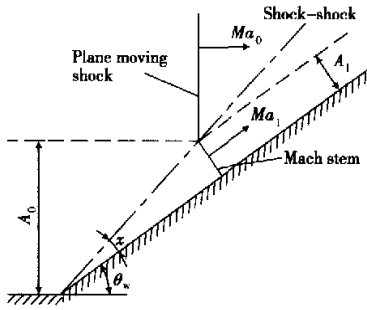


Fig. 6 Shock-shock regime around a wedge

表 2 给出了此内楔角度在不同入射激波马赫数下三次 shock-shock 扰动(依次壁面 shock-shock, 中心线 shock-shock 和壁面 shock-shock)的激波前沿后的气流温度和激波长度尺度计算值。表中 Ma_0 为初始的入射激波马赫数, T_{s1} , T_{s2} 和 T_{s3} 分别为三次 shock-shock 扰动的激波前沿后的气流温度, l_1 , l_2 和 l_3 为三次 shock-shock 的激波长度尺度。

由表可知,经过 shock-shock 扰动,激波前沿后的温度逐渐上升,而激波前沿的长度尺度逐渐降低,经过三次 shock-shock 扰动之后,前沿激波的长度尺度都在 1mm 左右。辛烷值为 92 的汽油的点火温度一般为 663K^[7](本实验采用 93 号汽油,应接近于此值),由表中数据可知,此温度处于第二次 shock-shock 扰动和第三次 shock-shock 扰动之间,特别是在反射激波后,这些区域的温度更高,所以点火理论上可能发生在此区域,此时的激波长度尺度在几个毫米的范围内,相当于电火花点火的放电间隙。在高入射激波马赫数条件下,激波聚焦的温度更高,因而利于点火,而在低马赫入射激波条件下,聚焦的温度较低,此时燃料的着火条件相对苛刻,因而不易于点火。

Table 2 Parameters just behind shock front during the process of shock focusing

No.	Ma_0	T_{s1}/K	l_1/mm	T_{s2}/K	l_2/mm	T_{s3}/K	l_3/mm
1	1.95	668	16.1	707	6.5	1053	1.22
2	1.76	591	15.3	620	6.2	891	1.13
3	1.69	568	14.9	594	6.0	846	1.09
4	1.62	538	14.4	561	5.8	789	1.04
5	1.60	531	14.3	553	5.7	770	1.02

5 结论

在 94mm × 94mm 方截面激波管上,入射激波马赫数 Ma_0 在 1.60 ~ 1.95 内,试验研究了汽油/空气可燃混合气体在内楔空腔激波聚焦方式下的点火特性。试验结果显示:当汽油/空气混合比例位于化学恰当比附近、 $Ma_0 = 1.69 \sim 1.95$, 汽油/空气可燃混合气体可以成功地被引燃,对应的试验段初始压力为 $p_1 = 0.003 \sim 0.01\text{MPa}$, 当 Ma_0 低于 1.69, 其他条件相同的情况下,可燃混合气体不能被点燃。流场的纹影图像显示,与无燃烧发生的情况相比,汽油/空气可燃混合气体被点燃后,反射激波的厚度变宽。

参考文献:

- [1] CHAN C K. Collision of a shock wave with obstacles in a combustible mixture[J]. *combustion and flame*, 1995, 100: 341 ~ 348.
- [2] Gelfand B E, Khomik S V, Bartenev A M, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture[J]. *Shock Waves*, 2000, 10: 197 ~ 204.
- [3] Bartenev A M, Khomik S V, Gelfand B E, et al. Effect of reflection type on detonation initiation at shock-wave focusing [J]. *Shock Waves*, 2000, 10: 205 ~ 215.
- [4] 司徒明. 煤油超燃冲压发动机性能分析[J]. 推进技术, 1998, 19(2). (SITU Ming. Performance analysis of hydrocarbon-fueled scramjet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(2).)
- [5] 何立明, 严传俊, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机的可燃范围及内流燃气温度与壁温的实验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(3). (HE Li-ming, YAN Chuan-jun, FAN Wei, et al. Experimental investigation on detonative range, inner flow gas temperature and wall temperature of pulsed detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(3).)
- [6] 孙英英. 碳氢燃料超燃火焰传播与性能的实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000.
- [7] Johnson, Auth. Fuels and combustion handbook [M]. First Edition, McGraw-Hill Book Company, 1951.

(编辑: 王居信)