

文章编号: 1001-1455(2002)03-0263-04

# 驻定在高速弹丸上的斜爆轰波

崔东明, 范宝春, 邢晓江

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 给出了锥形弹丸以 1600~2100m/s 的速度射入预混的氢-空气混合介质中形成驻定斜爆轰波的试验结果, 并讨论锥顶角、飞行体速度以及可燃介质当量比等因素对形成驻定斜爆轰波的影响。

关键词: 斜爆轰波; 超音速燃烧; 流场显示

\* 中图分类号: O381 文献标识码: A

## 1 引 言

爆轰是一种非常理想的高速率释放能量、高效率转换能量的燃烧过程, 其波后的化学反应速率非常快, 化学反应区宽度非常小。但是, 爆轰波通常以运动的形式存在, 它载着大量能量在可燃介质中以几千米每秒的速度传播, 稍纵即逝, 故它又是一种难以驾驭、极具破坏性的燃烧过程, 其应用范围也因此受到限制。以往的研究多限于在相对观察者静止的介质中传播的爆轰波, 而对相对于某飞行物体驻定的爆轰波研究较少。驻定爆轰概念的提出源于人们对高超音速推进技术的追求<sup>[1]</sup>, 其研究始于 60 年代, 与宇航技术发展有关<sup>[2]</sup>, J. A. Nicholls<sup>[3]</sup> 在实验室利用欠膨胀射流首次获得正驻定爆轰波, 限于当时的技术水平, 所获得的驻定爆轰波形状既不规整, 稳定性也不好。直到 80 年代末和 90 年代初, 才有清晰的驻定斜爆轰波的照片问世。1991 年, Menees<sup>[4]</sup> 在马赫数为 4.6 的电弧加热风洞内获得驻定斜爆轰波。1996 年, M. J. Kaneshige 和 J. E. Shepherd<sup>[5]</sup> 利用空气炮, 将直径为 25mm 的球加速到 2700m/s, 发射到 H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体中, 在一定条件匹配下获得了稳定的驻定斜爆轰波。国内对驻定斜爆轰波的研究主要集中在理论分析<sup>[6-8]</sup> 和数值计算方面<sup>[9]</sup>, 有关驻定斜爆轰波的试验研究尚未见报道。

我们以 25mm 滑膛炮为发射器, 将锥形弹丸以一定速度发射到氢-空气混合气中, 研究锥顶角、来流马赫数(飞行体速度)和可燃混合介质当量比等因素对形成驻定斜爆轰波的影响, 并通过光学摄影拍摄了驻定斜爆轰波的清晰照片。

## 2 实验装置与原理

在实验室形成驻定爆轰波主要有二种方法: 一种是通过超音速激波风洞、电弧加热风洞等设备形成超音速的流动, 并在固定于实验室的尖劈上形成相对地面驻定的斜爆轰波; 另一种是利用超高速发射系统, 将球型或锥型弹丸发射到充满可燃介质的容器中, 在一定条件下形成相对于飞行体驻定的斜爆轰波。本文采用后一种方法, 其实验装置简图如图 1 所示。

发射系统由 25mm 滑膛炮、消声装置和接弹器组成, 通过装药设计可将直径为 25mm 不同形状的弹丸以所需的速度发射到具有确定组分的可燃混合介质中, 其速度可控制在 1750~2100m/s 之间。实验系统包括两侧设有光学窗口的实验管, 加速燃烧管以及配气装置, 用于配置不同当量比的可燃气体; 数据采集系统由光学摄影仪和速度测量仪组成, 光学摄影仪包括脉冲光源、高压电源、延时器、照相机、菲涅尔透镜等, 用于拍摄驻定在飞行体上的斜爆轰波和采集相关数据。实验原理为: 首先按实验要求将配

\* 收稿日期: 2001-03-19; 修回日期: 2002-02-21

基金项目: 国防重点实验室基金资助项目(98JS 33.2.1.BQ0205)

作者简介: 崔东明(1955—), 男, 博士, 研究员。

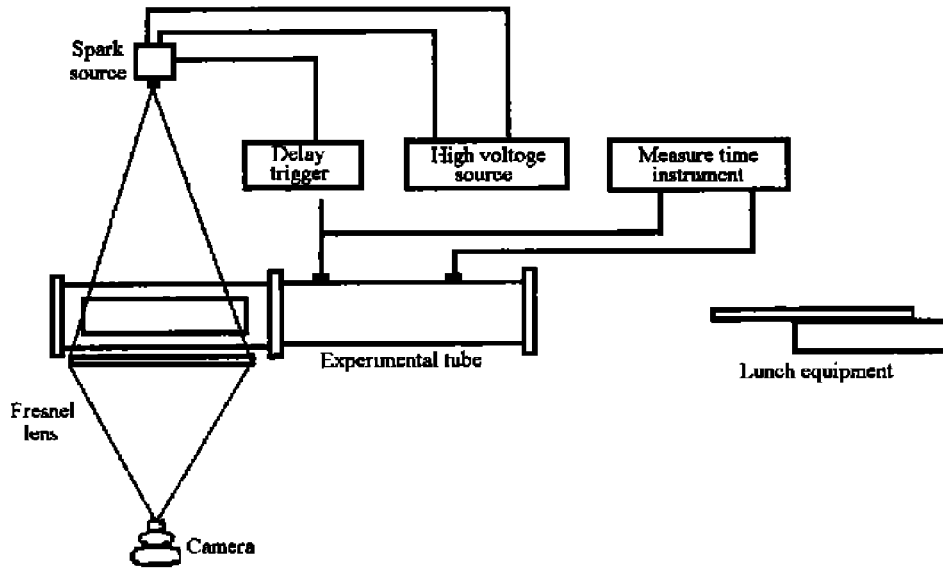


图 1 试验装置简图

Fig. 1 Experimental setup

置的预混可燃气体充入加速燃烧管和实验管内(可燃混合介质的初始压力为 0.1 MPa),将锥形弹丸射入加速燃烧管,弹丸飞行到触发装置时启动延时器,延时  $\Delta t$  后,延时器给光源信号,使光源闪光,光学摄影仪在实验段拍摄下弹丸飞行的照片。当弹丸顶角、可燃混合介质当量比、弹丸速度三者满足爆轰波驻定条件时,便可在弹丸顶部形成驻定斜爆轰波。

### 3 研究结果与讨论

由于化学反应,斜爆轰波的驻定较斜激波困难得多,化学反应导致斜爆轰波极曲线变形,和极度萎缩,驻定窗口变得狭小且受多种因素的影响。其中来流速度(弹丸速度) $v_0$ 、可燃介质组元浓度(当量比) $\phi$ 和支持斜爆轰波尖劈角(弹丸顶角) $\alpha$ 影响最大。下面通过一系列试验结果,讨论上述三种因素对形成驻定爆轰的影响。

#### 3.1 弹丸速度(来流速度)

图 2 为同样形状的弹丸在相同当量比  $\phi$  的氢气-空气混合气中以不同速度飞行的实验照片。此时只有当弹丸速度大于某临界值时,才有可能形成驻定斜爆轰波。在图 2 所示的情况中,弹丸顶部为套锥,小锥和大锥的顶角分别为  $30^\circ$  和  $90^\circ$ ,氢气-空气当量比  $\phi=0.7$ ,当弹丸速度为 1600m/s 时,仅形成驻定斜激波(如图 2(a));但当弹丸速度为 1870m/s 时,小锥顶部仍形成驻定斜激波,但经该激波预压后,在大锥作用下,形成驻定斜爆轰波(如图 2(b))。从照片可看出,驻定斜爆轰波的倾角较斜激波大且弯曲,

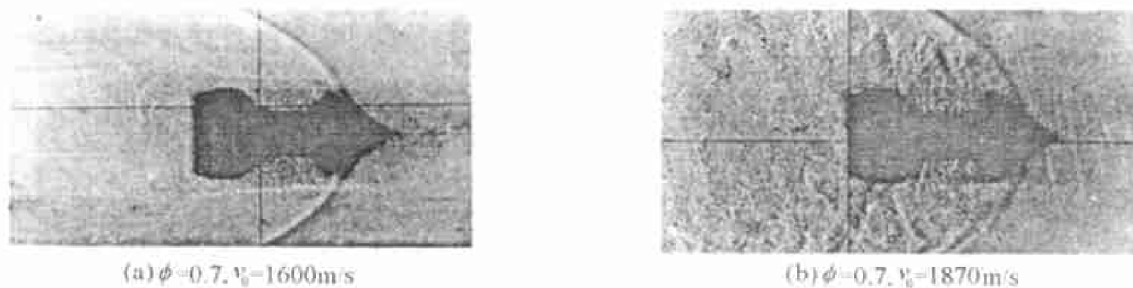


图 2 改变弹丸速度的试验结果

Fig. 2 Experimental results of changing projectiles velocity

波后有燃烧形成的横波。由于形成驻定斜爆轰波需要较高的弹丸飞行速度(来流速度),这增加了实验室获得驻定爆轰波的难度。

### 3.2 当量比

图3为与图2中形状相同的弹丸以相同的弹丸速度 $v_0$ ,射入不同氢气-空气当量比的介质中所获得的试验结果。对可燃混合介质来说,当量比愈趋近于1,临界速度愈大,形成驻定斜爆轰波所需的弹丸速度愈大,对于顶角确定的弹丸,为在较小的飞行速度下形成驻定斜爆轰波,应尽量使当量比偏离1,但如果偏离过大,超出驻定爆轰极限,也不能形成驻定斜爆轰波。图3中弹丸速度 $v_0=1870\text{m/s}$ ,当氢气-空气当量比 $\phi=0.5$ 时,由于超出驻定爆轰极限,故仅形成驻定斜激波(如图3(a)所示);当氢气-空气当量比 $\phi=0.7$ 时,则形成驻定斜爆轰波(如图3(b)所示)。

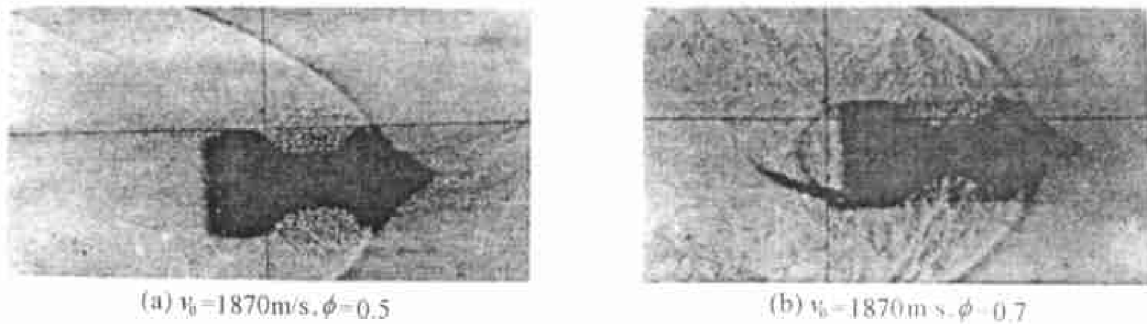


图3 改变当量比时的试验结果

Fig.3 Experimental results of changing equivalence ratio

### 3.3 顶角

图4为弹丸速度 $v_0$ 和氢气-空气当量比 $\phi$ 不变时,不同顶角的单锥型弹丸的试验结果。弹丸顶角的大小对形成驻定爆轰波影响很大,对于一定的弹丸速度,顶角过大,爆轰波脱体,顶角过小,仅能形成斜激波。图4中弹丸速度 $v_0=1870\text{m/s}$ ,氢气-空气当量比 $\phi=0.7$ ,图4(a)为当弹丸顶角 $\alpha=30^\circ$ 时形成斜激波的情况,图4(b)为当弹丸顶角 $\alpha=120^\circ$ 时形成驻定斜爆轰波的情况。很明显,当弹丸速度、可燃混合介质当量比一定时,弹丸顶角大,对超音速来流的阻碍大,形成的激波较强,容易点燃可燃混合介质形成驻定斜爆轰波。

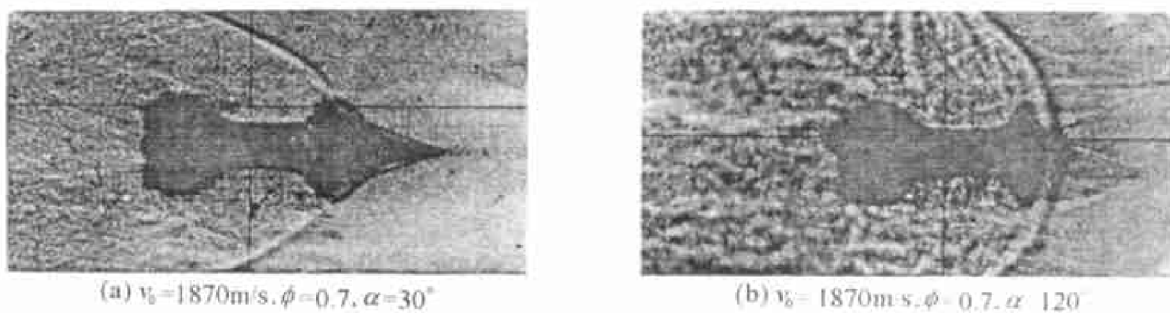


图4 改变弹丸顶角时的试验结果

Fig.4 Experimental results of changing conical vertex angle

### 3.4 弹丸形状

图5为两个单锥弹丸在氢气-空气当量比不变而弹丸速度变化时的试验结果。图5(a)、(b)的弹丸速度分别为 $1870\text{m/s}$ 和 $2100\text{m/s}$ ,氢气-空气当量比均为 $0.7$ ,图5(a)形成的是驻定斜激波,当弹丸速度增加到 $2100\text{m/s}$ 时单锥弹丸才形成驻定斜爆轰波。与单锥形弹丸相比采用双锥形弹丸,使可燃气体经第一道斜激波压缩后,温度上升以致相对于第二道激波来流具有较高的初温从而易于形成驻定斜爆轰波(如图1(b)、图3(b))。在同样氢气-空气当量比和顶角的情况下,单锥弹丸形成驻定斜爆轰所需的弹丸飞行速度比双锥弹丸高 $240\text{m/s}$ 。

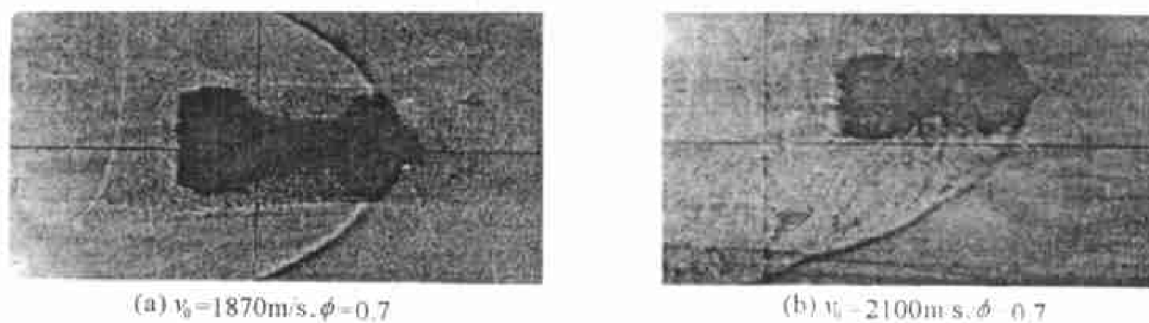


图 5 单锥弹丸的试验结果

Fig.5 Experimental results of a conic projectile

#### 4 结 论

综上所述,由于化学反应导致的斜爆轰波极曲线变形和萎缩,斜爆轰的驻定条件较斜激波苛刻得多,只有当弹丸速度、可燃混合介质当量比、弹丸顶角三者满足驻定条件时才可能形成驻定斜爆轰波。实验结果表明,与单锥弹丸相比双锥形弹丸可在较低飞行速度下形成驻定斜爆轰波,这对获得很高来流速度有困难的情况下,不失为一种措施。

#### 参考文献:

- [1] Dabora E K, Broda J C. Standing Normal Detonation and Oblique Detonation for Propulsion [R]. AIAA 93-2325, 1993.
- [2] Nicholls J A. Standing Detonation Waves [A]. Proceeding of the 9th International Symposium on Combustion [C]. Pittsburgh, P A: The Combustion Institute, 1969: 488.
- [3] Nicholls J A, Dabora E K. Recent Results on Standing Detonation Waves [A]. Eighth Symposium on Combustion [C]. Baltimore: Williams and Wilkins, 1962: 644-655.
- [4] Menees. Analytical and Experimental Investigations of the Oblique Detonation Wave Engine Concept [R]. AGARR-CP-479, 1991.
- [5] Kaneshige M J, Shepherd J E. Oblique Detonation Stabilized on a Hypervelocity Projectile [A]. 26th Symposium (International) on Combustion [C]. 1996: 3015-3022.
- [6] 袁生学. 论超音速燃烧[J]. 中国科学(A辑), 1998, 28(8): 735-741.
- [7] 崔东明, 范宝春. 用于推进的驻定斜爆轰的基本特征[J]. 宇航学报, 1999, 20(2): 48-54.
- [8] 袁生学, 黄志澄. 高超音速发动机不同燃烧模式的性能比较——斜爆轰波发动机性能评价[J]. 空气动力学学报, 1995, 13(1): 48-56.
- [9] 陈坚强, 张涵信, 高树椿. 冲压加速器燃烧流场的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 1998, 16(3): 297-303.

### Oblique Detonation Stabilized on a Hypervelocity Projectile

CUI Dong-ming, FAN Bao-chun, XIN Xiao-jiang

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** This paper presents the experimental results of the initiation and stabilization of an oblique detonation by launching a hypervelocity projectiles at velocities of 1700 ~ 2100m/s, into H<sub>2</sub>-air mixtures. The influences of the conical vertex angle, the velocity of projectile and equivalence ratio of combustible mixture on the generation of the standing oblique detonation are discussed.

**Key words:** oblique detonation; supersonic combustion; flow field visualization