

# 斜爆轰与斜爆轰推进系统的研究进展

王爱峰, 赵伟

中国科学院力学研究所高温气动重点实验室 (LHD), 北京 100190

**摘要:** 本文简述了斜爆轰的基本特征, 并对影响斜爆轰特性的楔角、斜爆轰角以及放热量三者之间的关系进行了描述, 在此基础上采用数值模拟对斜爆轰波现象进行了研究并介绍了斜爆轰的两种应用: 冲压加速器 (Ram Accelerator) 和斜爆轰冲压发动机 ODE (Oblique Detonation Wave Engine for Scramjet), 最后给出了斜爆轰研究中存在的问题。

**关键词:** 斜爆轰, 斜爆轰推进, 冲压加速器

## 0 引言

上世纪初, C-J爆轰理论<sup>[1,2]</sup>揭开了爆轰现象的神秘面纱。它假设无限大的化学反应速率, 把爆轰波简化成一道激波并带有瞬时的能量添加, 应用Ranking-Hugoniot理论可分析爆轰波波前和波后的状态参数。随着人们对爆轰现象的深入认识, 二十世纪 40 年代, Zeldovich, Von Newmann和Doring提出了著名的ZND爆轰理论模型<sup>[3]</sup>, 与C-J模型不同是, 它考虑的是有限速率, 把爆轰波的演化分成三个阶段: 前导激波加热, 诱导延迟期, 燃烧能量释放, 最后燃烧后的气体达到C-J状态。如果激波诱导化学反应所释放的能量足以维持爆轰波以恒定的速度传播, 则爆轰波可以自持传播。

爆轰波不仅可以在可燃物中产生, 还可以通过楔体驻定在来流为可燃混合气体的高超声速流场中。Lehr<sup>[4]</sup> 1972 年在观测高速弹丸在氢/氧或氢/空气反应介质中飞行时, 对弹头产生斜激波诱导的燃烧现象进行了研究, 观测到了不同的燃料当量比、飞行马赫数以及弹丸外形等匹配条件下出现的低频不稳定、高频振荡现象以及过驱爆轰和欠驱爆轰现象。

随着吸气式推进研究的不断深入, 超燃冲压喷气发动机 Scramjet<sup>[5]</sup> (Supersonic Combustion Ramjet) 的难点凸显出来。当来流速度增大到近 2km/s时, 气流驻留在燃烧室的时间急剧减小, 燃料与空气均匀混合、稳定燃烧成为 Scramjet 的关键技术难点, 直接影响了发动机的燃烧效率和推力。因此为了使燃料与空气有足够时间混合与燃烧, 不得不增加燃烧室的尺寸, 这就增加了飞行器的重量和阻力。相比之下, 由于驻定斜爆轰的混合过程在燃烧室前部完成, 降低了对燃烧室的要求, 同时爆

轰过程的燃烧效率较高, 使得斜爆轰推进系统 ODWE<sup>[6,7,8]</sup> (Oblique Detonation Wave Engine for Scramjet) 的概念逐渐受到重视。斜爆轰推进的概念是: 将激波驻定在燃烧室的进气口, 超音速可燃气体流跨越该波后产生爆轰波, 快速释放能量后经尾喷管膨胀加速, 产生推力。由于斜爆轰波的反应区极短, 无需很长的燃烧室, 这就避免了超燃冲压喷气发动机的不足, 同时燃烧效率较高。对未来吸气式高超声速飞行器的推进系统具有潜在的应用前景。

## 1 斜爆轰波的简化理论分析

按照Adelman的定义, 斜爆轰波<sup>[9]</sup>就是燃烧压力场影响波的自身, 即斜爆轰为燃烧与斜激波的耦合。

考虑一个楔角为 $\theta_w$ 的理想平面超声速流场。类似于斜激波在拐角处形成一道角度为 $\beta_w$ 的斜爆轰波。下面作如下简化: (1) 来流为预混未燃气体, 混合均匀、流动稳定; (2) 化学反应层很薄可看长波阵面; (3) 化学反应等效于放热, 放热量为 $\dot{Q}$ ; (4) 波前后物性相同, 均为定比热理想气体; (5) 流动无粘绝热。

简化模型如图 1, 考虑两种状况, 上图为过驱动斜爆轰; 下图为欠驱动斜爆轰, 存在泰勒波, 与上图相比, 增加了第四区。通过简化, 守恒方程如下:

(1) 自由来流为 1 区与 2 区, 中间为斜激波, 满足斜激波的守恒关系式:

$$\rho_1 V_{1n} = \rho_2 V_{2n}$$

$$P_1 + \rho_1 V_{1n}^2 = P_2 + \rho_2 V_{2n}^2$$

$$h_1 + \frac{1}{2} V_{1n}^2 = h_2 + \frac{1}{2} V_{2n}^2$$

其中：

$$V_{1n} = V_1 \sin \beta_w$$

$$V_2 = [V_{2n}^2 + V_1^2 \cos^2(\beta_w)]^{1/2}$$

$$V_{2n} = V_2 \sin(\beta_w - \theta_2)$$

(2) 2区与3区之间为燃烧带薄层，

$$\rho_2 V_{2n} = \rho_3 V_{3n}$$

$$P_2 + \rho_2 V_{2n}^2 = P_3 + \rho_3 V_{3n}^2$$

$$h_2 + \frac{1}{2} V_{2n}^2 + \tilde{Q} = h_3 + \frac{1}{2} V_{3n}^2$$

其中：

$$V_{3n} = V_3 \sin(\beta_w - \theta_3)$$

$$V_3 = [V_{3n}^2 + V_1^2 \cos^2(\beta_w)]^{1/2}$$

$\tilde{Q}$ 为放热量

将放热无量纲化，并把能量方程改写成：

$$C_p T_1 + \frac{1}{2} V_{1n}^2 = C_p T_2 + \frac{1}{2} V_{2n}^2$$

$$C_p T_2 + \frac{1}{2} V_{2n}^2 + RT_1 Q = C_p T_3 + \frac{1}{2} V_{3n}^2$$

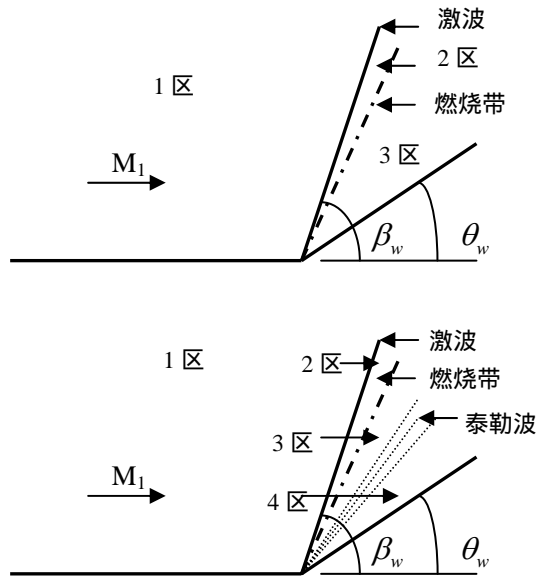


图1 斜爆轰波简化分析模型

Fig. 1 Simple Analysis' Model of Oblique Detonation Wave

通过以上方程即可解出楔角、斜爆轰角与放热量之间的关系。图2给出了斜爆轰角与斜楔角的关系。

从图2可以看出：

- (1) 当  $Q=0$  时，为斜激波解。对于同一个  $\theta$ ，存在两个  $\beta$  值，其中大的对应于强解，小的对应于弱解。
- (2) 当放热量增加时，弱解  $\beta$  增大。同时  $Q$  趋于无穷大时， $\beta=90^\circ$ ， $\theta=0$ ，对应于 C-J 平面爆轰。
- (3) 不同的  $Q$  值， $\theta$  都有一极限值，把所有的极限点连线为 CB，对应于如果选择的楔角大于此极限值时，斜激波或斜爆轰波将演化为脱体波。
- (4) 不同的  $Q$  值， $\beta$  都有一个最小值，对应于 C-J 状态时的  $\beta$  值，所有 C-J 状态点连线为 CA，在该点右侧  $M_{3n} < 1$ ，对应于过驱斜爆轰，在该点左侧  $M_{3n} > 1$ ，对应于弱驱斜爆轰。过驱斜爆轰为 CA 与 CB 所夹的区域。
- (5) 一般认为自由传播的弱爆轰 ( $M_{3n} > 1$ ) 是不存在的，然而在强迫流动的情况下则不同，因而 Strehlow<sup>[10]</sup> 称其为超声速燃烧。

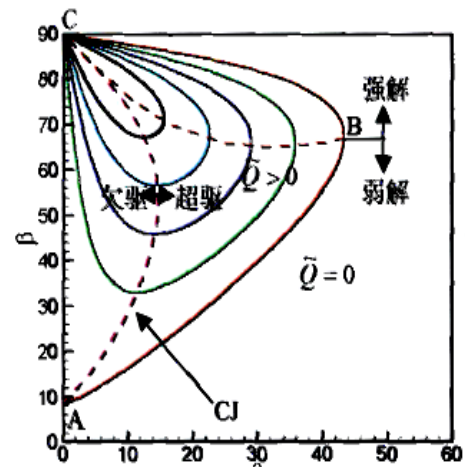


图2 平面二维斜爆轰极图<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Planar Oblique Detonation wave Angle VS. Wedge Angle

同时我们也可以由上面的状态方程加上 C-J 条件推出  $\beta_{CJ}$  与  $\theta_{CJ}$  的关系：

$$\theta_{CJ} = \beta_{CJ} - \sin^{-1} \left[ 1 + \left( \frac{(\gamma + 1) M_1^2 \sin \beta_{CJ} \cos \beta_{CJ}}{1 + \gamma M_1^2 \sin^2 \beta_{CJ}} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

如果给定来流的  $M_1$ ，且确定燃料及其混合比，则  $\theta_{CJ}$  恒定，那么  $\beta_{CJ}$  也恒定。如果减小  $\theta$ ，相当于斜爆轰波后的均匀超声速流场叠加一个

扇形膨胀区。考虑到膨胀波不能够穿透声速线，因此 $\beta_{CJ}$ 将保持不变，这就是自持斜爆轰波<sup>[11]</sup>。

## 2 斜爆轰波的数值分析

Li et al.<sup>[12]</sup>在 1994 用有限速率模型对氢/空

燃点以上，最后在锥形体的尾部会聚形成爆轰。由爆轰产生的高压推动锥体，使其加速到很高的速度。从公开的资料表明<sup>[18]</sup>：美国华盛顿大学已取得了每秒 2.4 千米的发射速度。日本东北大学 Sasoh<sup>[16]</sup>获得 2.7 千米的速度。因冲压加

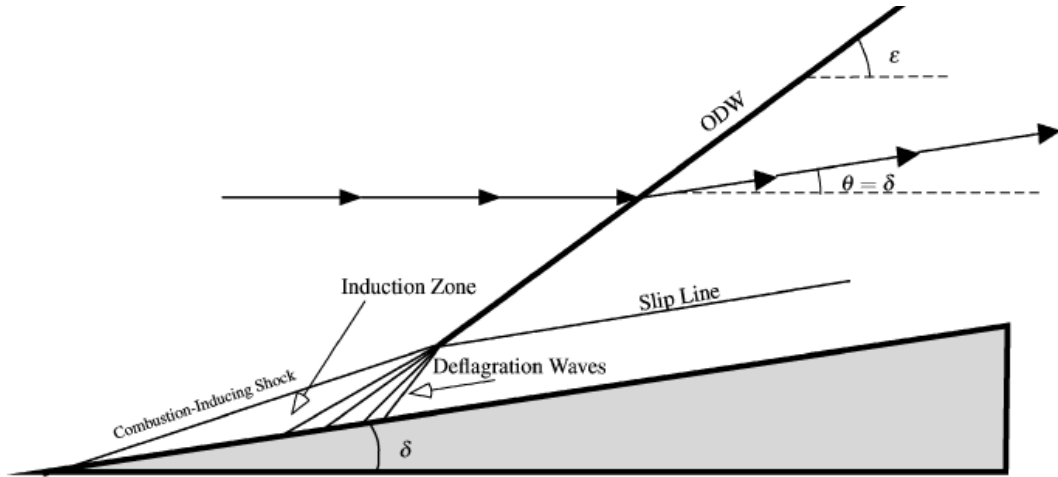


图 3 斜爆轰波的结构示意图

Fig. 3 Structure of the Oblique Detonation Wave

气的混合气体斜爆轰进行了详细的研究，具体的分析结构示意图见图 3。

由图 3 可以看出，斜爆轰结构的波面包括两个部分，靠近上游的是斜激波，下游是斜率更大的斜爆轰波。两者之间通过一个拐点联接。经过激波压缩的气体运动到一定的距离发生了燃烧反应，形成了爆燃波。因此，波面上的拐点实际上是斜激波、斜爆轰波和爆燃波形成的三波点。由于爆燃波和爆轰波形成的波后气流密度是不同的，因此从拐点向下存在一条滑移线。

同时 Li et al.<sup>[13]</sup>又指出：边界层对斜爆轰的影响较小，仅仅使得斜爆轰角增大。随后 Yu Daimon et al.<sup>[14]</sup>重复了 Li 的工作，利用迎风 TVD 格式，单步化学反应模型求解 NS 方程，他们得到的结论是：边界层使得激波变强，波后温度更高，波后温度越高就缩短了诱导长度，使得爆轰波更早得出现。

## 3 斜爆轰的工程应用

### (1) 冲压加速器 (Ram Accelerator)

在冲压加速器中，中心锥形体以超声速被发射进入一个充满预混可燃气体的燃烧室中。由飞行器诱导出的锥形斜激波在飞行器表面和燃烧室壁面间重复反射，将可燃气体加热到自

速器发射的是纯有用质量，所以从理论上讲，冲压加速器的效率是很高的。但是，由于飞行体可被加速的极限速度与混合气的极限爆轰速度有关，并且飞行体的速度在不断变化，所以发射管的设计和爆轰气体的选择是冲压加速器成功的关键。

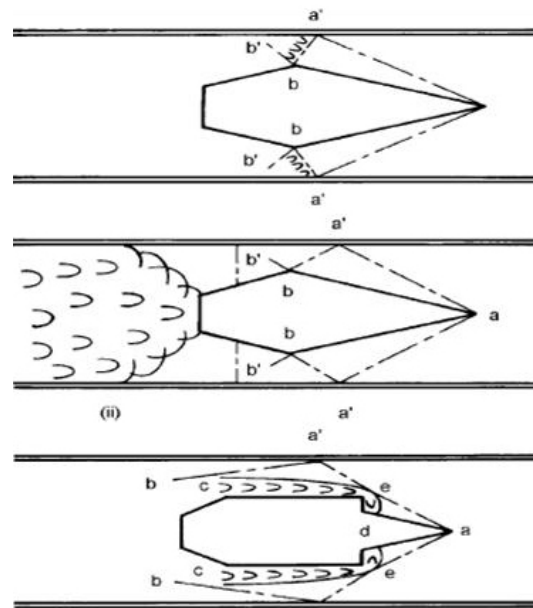


图 4 冲压加速器的原理图<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Principle of Ram Accelerator

## (2) 斜爆轰波推进系统与超燃冲压推进系统

吸气式超燃推进系统一般分为两种,即冲压喷气系统 Dramjet ( Detonation Driven Ramjet ) 或者斜爆轰超燃冲压喷气系统 ODWE ( Oblique Detonation Wave Engine for Scramjet )。

超燃冲压发动机(图 5 ,图 6)是与机身一体化的推进系统,发动机位于机身下部。工作原理:来流经进气口一系列斜激波的压缩形成高温高压气体,随后燃料经与气流平行或垂直的喷嘴喷入其间,并在超声速状态下混合燃烧,燃烧产物由尾喷管膨胀喷出产生推力。

斜爆轰波发动机是将激波驻定在燃烧室的进气口,可燃的超音速来流跨越该波后迅速燃烧,其产物经膨胀管加速后达到预定的出口速度从而产生推力,可以看出,斜爆轰波发动机实质上是超燃发动机的一种极限情况。由于斜爆轰波的反应区极短,因此无须很长的燃烧室,可以大大减小发动机自身的重量以及由壁面引起的各种波系损失。如果驻定斜爆轰波稳定,则无须采用火焰助稳系统。与超燃发动机相比,在飞行速度较高的情况下,斜爆轰波发动机的推进效率优于超燃发动机。且体积小、结构简单,具有极大的潜在应用前景。

## 4 结论

本文分析了斜爆轰以及斜爆轰推进的工作原理,得到如下结论:

(1)通过对斜爆轰波的简单理论分析和文献调研,驻定斜爆轰波是可行的,实验也证实了这种现象。

(2)对斜爆轰初步的数值分析发现:驻定斜爆轰波存在有非常复杂的波系结构,其中包括斜激波,爆燃波,滑移线,爆轰波等。

(3)斜爆轰有着较高的燃烧效率,具有良好地工程应用前景。

## 5 斜爆轰研究中存在的问题

(1)初步的研究表明:欠驱动斜爆轰在强迫流动中是存在的,那么泰勒稀疏波也存在。泰勒稀疏波对斜爆轰影响目前尚未有深入的研

究。

(2)如果斜爆轰波是通过驻定斜激波的压缩导致温度升高诱导发展而形成,则同时出现的爆燃波对斜爆轰波的发展演化必然产生较大的影响,影响机制目前不明确。

(3)部分研究者认为边界层对斜爆轰的影响有限,但又有其他观点认为:边界层使得温度传递加快,促使斜爆轰提前形成。这种争议需要进一步验证。

(4)斜爆轰现象存在着复杂的波系,其中的激波与燃烧波耦合与解耦机理较为复杂。也是爆轰物理中基础难题。其中也涉及到斜爆轰的稳定性研究,它是斜爆轰能否工程应用的关键。

(5)以前的实验大多是在预混的可燃气体中进行,对于动态的混合、扩散的中可燃气体(非均质可燃气体)的斜爆轰现象,实验研究具有挑战。

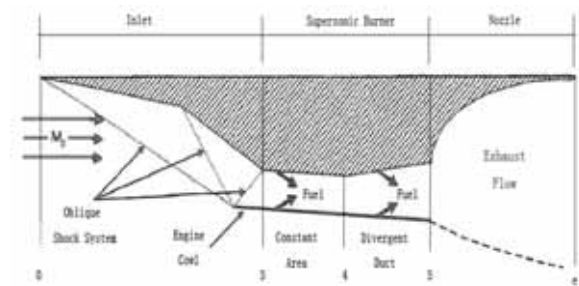


图5 平面超燃冲压发动机的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a planar geometry scramjet engine

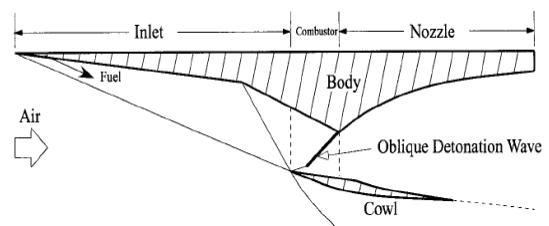


图6 超燃冲压发动机外部压缩示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Schramjet engine with external compression

## 参考文献

- [1]Chapman, D.L., On the Rate of Explosions in Gases, Phil. Mag., 1899, 47:90
- [2]Jouguet, E., Sur la propagation des reaction Chimiques

dans les gaz, J. Maths. Pure Appl., 1905, 7:347

- [3] Zeldovich, Ya. B., On the Theory of the Propagation of Detonation in Gaseous System, J. Exp. Theor. Phys. USSR, 10,524 Translation NACA Tech. Memo 1261, 1940
- [4] Lehr,H.F., Experiments in Shock-Induced Combustion, Astronautica Acta,Vol.17, 1971,PP.589-579
- [5] McClinton, C. R., Raush, D. R., Sitz, J., and Reukauf, P., Hyper-X program Statues, AIAA Paper 2001-1910, April 2001
- [6] Menees, G. P., Adelman, H. G., Cambier, J.-L., and Bowles, J.V., Wave Combustors for Trans-Atmospheric Vehicles,Journal of propulsion and Power,1992,8(3):709~713
- [7] Camvier, J. L., Adelman, H., and Menees, G., Numerical Simulations of an Oblique Detonation Wave Engine, AIAA Paper 88- 0063,1988
- [8] Atamanchuk, T., and Sislian, J., On- and Off- Design Performance Analysis of Hypersonic Detonation Wave Ramjets, AIAA Paper 90-2473,1990
- [9] Adelman H G. Analytical and Experimental Validation of the Oblique Detonation Wave Engine Concept. AIAA 88-0097, 1988
- [10] Strechlow R A. Combustion Fundamentals

McGraw-Hill Book Company,1984

- [11] 袁生学,黄志澄 高超声速发动机不同燃烧模式的性能比较-斜爆轰发动机性能评价,空气动力学报,Vol13 pp48-56,1995
- [12] Li,C., Kailasanath, K., and Oran, E. S., Detonation Structures Behind Oblique Shocks,Physics of Fluids,Vol.6, No.4, April 1994,PP.1600-1611
- [13] LI C, ORAN E S. Effects of Boundary Layers on Oblique-Detonation Structures [R]. AIAA paper 93-0450.
- [14] Yu DAIMON,Akiko MATSUO,Effect of Boundary Layer for Wedge-Induced Attached Oblique Detonation
- [15] Michael A. Nettleton, The Applications of Unsteady,Multi-dimensional Studies of Detonation Waves to Ram Accelerators,Shock Wave,2000 10:9-22
- [16] A.Sasoh, Laser-propelled ram accelerator J. Phys. IV France 10 (2000)
- [17] 任登凤,许厚谦, 驻定斜爆轰波形态分析与数值模拟, 南京理工大学学报, 2003
- [18] Elvander JE, Knowlen C, Bruckner AP, High Velocity Experiments Using a Multi-Stage Ram Accelerator, Third International Workshop on Ram Accelerators, 1997

## Investigation of an Oblique Detonation and its applications

WANG Ai-feng, ZHAO Wei

LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Primary factors affecting the characteristic of an Oblique Detonation, such as the relationships among wedge angle, Oblique Detonation angle and energy releasing parameters are analyzed firstly. By a numerical simulation to an Oblique Detonation, the mechanisms to generate the Oblique Detonation are described in detail. The results indicates that the Oblique Detonation is good potential applications in Ram Accelerator and Oblique Detonation Engine for Scramjet. At last, some problems about the ODE study is given.

**Key Words:** Oblique Detonation, ODE, Ram Accelerator