

气相规则胞格爆轰起爆与传播的统一框架理论

姜宗林, 滕宏辉, 王春, 韩桂来, 刘云峰

(中国科学院高温气体动力学重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要: 本文回顾了气相规则胞格爆轰起爆与传播研究的发展, 根据中国科学院高温气体动力学重点实验室在爆轰现象方面的研究进展, 提出了气相规则胞格爆轰波起爆和传播的统一框架理论。该框架理论由一个波传播/化学反应相互作用机制, 两个基本物理过程(热点和化学反应带加速), 三个临界状态(临界传播状态、临界起爆状态和临界胞格尺度)等六个关键要素构成。应用五个典型物理算例, 界定了这些关键要素的物理机制、表现特性及其客观存在性。应用这个爆轰波统一框架理论, 本文成功地解释了经典爆轰理论、应用 CFD 技术获得的多维爆轰波结果和实验观察到的胞格爆轰现象依据的关键要素。虽然爆轰波的三个临界状态需要进一步的量化研究, 但是应用框架理论解释已经获得的爆轰波研究结果表现的统一性及其对深入研究爆轰现象的预测性表明了该框架理论对于开展深入的爆轰物理具有重要意义。

关键词: 气相爆轰波, 规则胞格, 爆轰起爆与传播, 统一框架理论

0 引言

自然界中的大部分燃烧现象是在等压条件下, 通过分子扩散和热传导机制完成的能量释放过程, 其燃烧波通常以每秒几米到几十米的速度传播。而爆轰是一种在预混气体中超声速传播的燃烧波, 它通过前导激波压缩可燃气体实现自燃点火, 并借助燃烧释放的化学能实现自持传播。爆轰波的这种特性不仅给煤矿、化工厂等存在可燃气体的场所带来严酷的安全防爆问题, 也为发展高效的热力推进技术提供了潜在的可能性。一百多年来, 人们对爆轰波的发展、形成和传播过程, 通过实验、数值和理论分析, 进行了广泛的研究、获得了大量的结果, 对于爆轰现象的起爆和传播机制有了比较深入的认识。

爆轰物理的研究中通常把爆轰波的起爆过程分为两类: 直接起爆和爆燃转爆轰 (DDT)。虽然直接起爆是通过外在强激波实现的, 但是起爆过程中也观察到强激波也会首先衰减到 CJ 状态以下, 然后重新加速到稳定爆轰波。这种形成过程和爆轰波的 DDT 过程是类似的, Lee 等^[1]以此为基础提出了爆轰波起爆的 SWCER (Shock Wave Coherent Energy Release) 理论, 然而这种起爆过程的内在物理机制和物理化学过程尚不清楚。Oppenheim 等^[2]实验观察了管道中的 DDT 过程, 发现在湍流火焰面附近会发生热点爆炸, 从而由燃烧波发展为爆轰波。Thomas 等^[3]采用湍流射流点火过程研究了爆轰起爆问题, 也观察到了热点爆炸及其发展过程。White^[4]在上个世纪六十年代就观察到了爆轰波的胞格结构, 并发现胞格结构的大小和规则性与预混可燃气体的化学反应参数和热力学状态密切相关。进一步的研究表明: 低压条件下、掺混了较多惰性气体爆轰的胞格具有良好的规则性, 但是随着压力的升高或者惰性气体的减少, 爆轰胞格尺度减小、

其结构表现出越来越多的不规则性。数值模拟的结果^[5]显示, 具有较低活化能的混合气的爆轰波会形成规则的胞格结构, 而较高的活化能会导致不规则的胞格结构。Shepherd 等^[6]采用平面激光诱导荧光 (PLIF) 方法研究了爆轰波波面附近的流场, 发现规则爆轰的波面具有更复杂规则的物理化学结构。

为了把握爆轰现象的基本物理特征, 人们提出了 CJ 和 ZND 理论。尽管这些理论忽略了爆轰波的复杂结构, 但是获得的爆轰波的气动特征参数与实验结构复合良好。应用 CFD 技术和不同的化学反应动力学模型, 大量数值模拟结果给出了表现不同特征的一维、二维、三维爆轰波, 揭示了相关的物理机制。同时应用流动显示技术, 实验研究也获得了爆轰波的多维特征结构, 这些研究结果既表现出与理论和计算研究结果的一致性, 也给出不同特征的差异性。

一般来讲, 由于爆轰现象的复杂性, 人们从不同的角度开展爆轰波的研究, 应用不同的物理模型, 可以获得从某一个侧面反应了爆轰波某一个方面的特征的结果和物理机制, 并具有一定的客观性和科学性。但是, 这也为爆轰物理的研究带来一定的困惑。本文通过总结爆轰现象的相关研究进展, 根据中国科学院高温气体动力学重点实验室在爆轰现象方面的计算研究, 提出了气相规则胞格爆轰波起爆和传播的统一框架理论。该框架理论由一个机制, 两个基本物理过程, 三个临界状态等五个关键要素构成。其中的一个物理机制是波传播/化学反应带相互作用 (Wave Propagation/Chemical Reaction Interaction, WPCRI); 两个基本物理过程即热点起爆 (Hot Spot) 和化学反应带加速 (Chemical Zone Acceleration); 三个临界状态即临界传播状态 (Critical Propagation State)、临界起爆状态 (Critical Initiation State) 和临界胞格尺度 (Critical Cell Size)。本文应用 CFD 计算技术, 通过五个典型物理算例的研究, 界定了这五个关键要素的物理机制、表现

特点及其客观存在性。应用这个爆轰波统一框架理论, 本文成功地解释了经典爆轰理论、应用 CFD 技术获得的多维爆轰波结果和实验观察到的胞格爆轰现象依据的关键物理要素。虽然爆轰波的三个临界状态需要进一步的定量化研究, 但是应用框架理论解释已经获得的爆轰波研究结果的统一性及其对深入研究爆轰现象的预测性表明了该关键理论对于开展爆轰物理具有重要意义。

1 控制方程与数值方法

数值模拟采用多组元的二维 Euler 方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + S_c = 0$$

其中

$$U = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_n \quad \rho u \quad \rho v \quad e]^T$$

$$F = [\rho_1 u \quad \rho_2 u \quad \dots \quad \rho_n u \quad \rho u^2 + p \quad \rho uv \quad (e+p)u]^T$$

$$G = [\rho_1 v \quad \rho_2 v \quad \dots \quad \rho_n v \quad \rho uv \quad \rho v^2 + p \quad (e+p)v]^T$$

$$S_c = \left[\dot{\omega}_1 \quad \dot{\omega}_2 \quad \dots \quad \dot{\omega}_n \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T$$

在上述公式中 $\rho_i (i=1 \dots n)$ 是第 i 个组元的密度, 总密度可以表示为 $\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i$ 。 u 和 v 分别是 x 方向和 y 方向的速度。 e 是单位体积的总能:

$$e = \rho h - p + 1/2 \times \rho(u^2 + v^2)$$

$$h = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i / \rho$$

其中 h 是单位体积的总焓, h_i 是第 i 个组元焓值。采用理想气体状态方程, 其表达式为:

$$p = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i T,$$

其中 R_i 是第 i 个组元的气体常数, T 是气体温度。控制方程采用了 DCD 格式^[7]进行离散。在化学反应源项中, $\dot{\omega}_i$ 是第 i 个组元的单位体积质量生成率, 由于化学反应模型确定。本文采用基元反应模型, 由质量作用定律可以得到组分 i 的单位体积质量生成率:

$$\dot{\omega}_i = M_i \sum_{k=1}^{nq} (v_{ik}'' - v_{ik}') \left[\sum_{l=1}^{ns} (\alpha_{lk} c_{xl}) \right] \left[k_{fk} \prod_{l=1}^{ns} (c_{xl})^{v_{lk}'} - k_{bk} \prod_{l=1}^{ns} (c_{xl})^{v_{lk}''} \right]$$

其中 M_i 为第 i 种组分的摩尔质量, c_{xi} 为组分 i 的摩尔浓度, α_{lk} 为第 k 个反应中组分 i 的三体效应系数。对于绝大多数反应, 可以采用了 Arrhenius 定律计算反应速率:

$$k_{fk} = A_k T^{n_k} \exp\left(\frac{-Ea_k}{R_u T}\right)$$

其中 A_k 为频率因子, n_k 为温度指数, Ea_k 为活化能, R_u 为普适气体常数。考虑到其它燃料的基元反应模型比较复杂, 具有很大的不确定性。本文以化学反应机制比较成熟的氢气为燃料, 采用了 11 组元 23 个化学反应的氢气和空气反应模型^[8]。

2 环形激波聚焦诱导的热点起爆

爆轰热点起爆过程的流场常常是含有激波和化学反应放热的复杂流场, 以前的研究者从不同的角度出发, 分别对各种过程进行研究, 得到了许多不同的结论。为了排除复杂现象的影响, 研究热点起爆的物理机制, 本文设计了物理算例, 即环形激波聚焦诱导的热点起爆过程, 其计算的物理域如图 1 所示^[9]。环形激波在运动到突扩管道时发生绕射, 绕射激波在对称轴上聚焦形成高温高压区, 在适当条件下可以诱导可燃气体的点火、燃烧与爆轰。

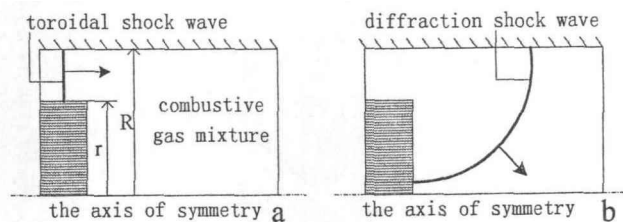


图 1 环形激波聚焦示意图

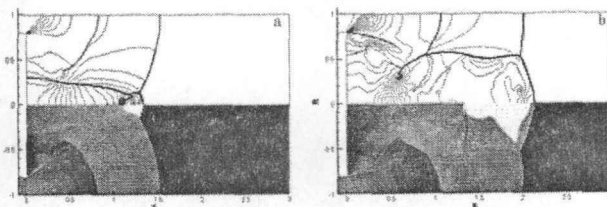


图 2 激波马赫数 2.71 时的压力(上)和温度(下)流场

图 2 显示了马赫数 2.71 时的流场, 可以看到聚焦后的激波形成了马赫反射, 马赫干逐渐扩张并略微向前凸起。可以看到聚焦后的流场中温度明显升高, 在马赫干后方形成了三角形的高温燃烧带, 其

中的最高温度约为 2400K, 表明聚焦形成的高温区点燃了可燃气体。为了研究这种燃烧的特征, 图 3 给出了图 2(b)中沿着直线 $x=1.8$ 的压力、温度和密度, 可以看到燃烧带和反射激波是分别独立传播的; 图 4 给出了不同时刻对称轴上的压力和温度分布, 表示了燃烧带和激波的传播过程。可以看到激波逐渐衰减, 燃烧带逐渐滞后, 两者并不是耦合传播的。因此, 马赫数 2.71 的激波聚焦虽然点燃了可燃气体, 但仅仅形成了爆燃波, 没有发展成爆轰波。

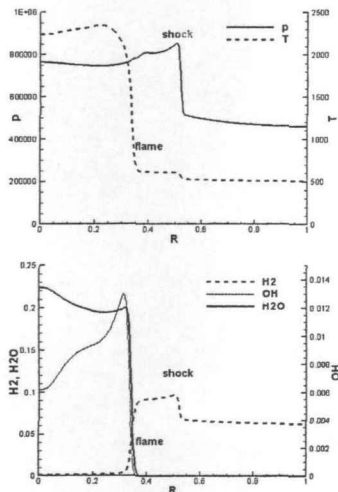


图 3 沿图 3(b)中 $x=1.8$ 的压力、温度和密度曲线

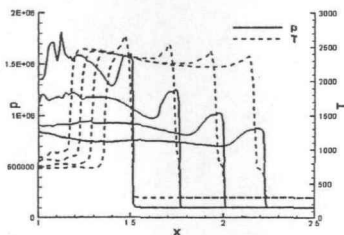


图 4 马赫数 2.71 情况下对称轴上的压力和温度

马赫数 2.72 的聚焦点火过程如图 5 所示, 可以看到聚焦后的流场中形成了蘑菇状的火焰, 最后发展成为激波和燃烧带耦合传播的爆轰波。图 6 显示了图 5(a)中沿 $x=1.05$ 和 1.17 的压力和温度曲线, 可以看到上游的激波和燃烧带相互作用, 耦合形成高速传播的爆轰波, 而下游的激波和燃烧带是不耦合的爆燃波, 但是最后被上游的爆轰波吞没。

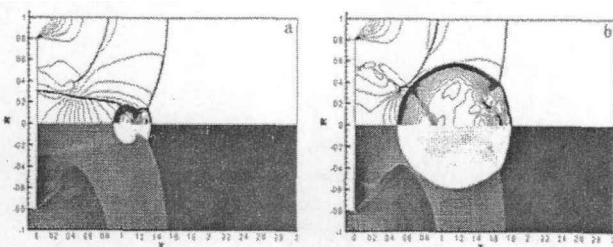


图 5 激波马赫数 2.72 时的压力 (上) 和温度 (下) 流场

为了研究热点起爆到爆轰波的形成过程, 图 7 给出了不同时刻沿对称轴上的压力、温度和密度分

布的变化。由图可见流场中燃烧带的状态到某个临界状态后, 初始的弱压缩波在化学反应的支持下实现了自我增强, 即燃烧强化了前导激波, 激波反过来促进并加速了燃烧。这种反馈现象是热点诱导爆轰波的关键物理机制, 表现为压力波传播和化学反应带的相互作用 (Wave Propagation/Chemical Reaction Interaction, WPCRI)。正反馈现象发生时热点区域达到的状态称为临界起爆状态。

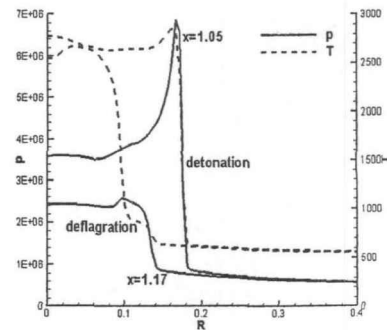


图 6 沿图 5(a)中 $x=1.05$ 和 1.17 的压力和温度曲线

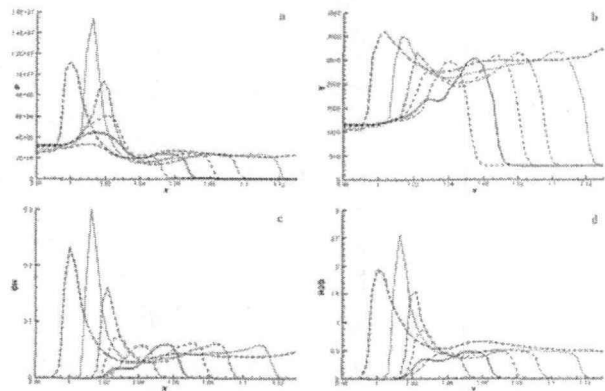


图 7 热点形成过程中沿对称轴的压力、温度、OH 和 H_2O 密度分布

图 7 的压力、OH 和 H_2O 密度分布进一步表明热点起爆时发生了明显的过驱动现象, 即压力和燃烧产物出现峰值, 明显强于稳定的爆轰波。热点起爆以后, 前导激波不断衰减, 化学反应弱化, 在负反馈作用下, 逐渐形成稳定的爆轰波。这里观察到的物理现象与直接起爆表现出来的特点是一致的

3 热点起爆与临界起爆状态

图 8 显示了马赫数 2.9 的激波在可燃气体中和障碍物相互作用的示意图^[10]是本文研究的第二个算例。可燃气体的初始温度 300K, 初始压力 1.0atm, 图 9 显示了爆轰波的形成过程的压力分布。由图可以看到激波和第一个障碍物作用发生反射, 形成上行激波, 热点出现在第二个障碍物的左上方, 并发展成为爆轰泡 (图 8d)。

为了研究临界起爆状态的存在性, 本文研究了两种流场状态, 它们的初始条件完全一致, 仅仅障碍物间距不同。图 10 给出了中间产物 HO_2 组分的和流场温度分布。由图可以看到激波和首个障碍物

的作用不足以诱导爆轰，但是形成了具有较高化学活性的中间产物，并且输运到了第二个障碍物的上游。当高速流动的中间产物与障碍物发生作用时，气流滞止提高了反应气体的热力学状态，触发了热点附近的正反馈机制，导致了爆轰泡发生与发展。

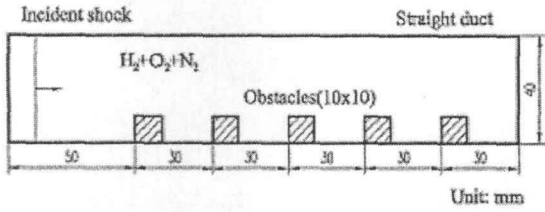


图 8 激波和障碍物作用示意图

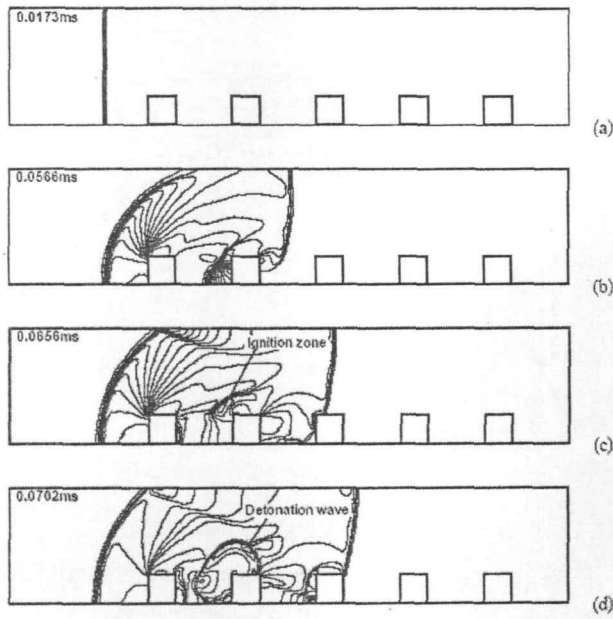


图 9 爆轰波形成过程的压力流场

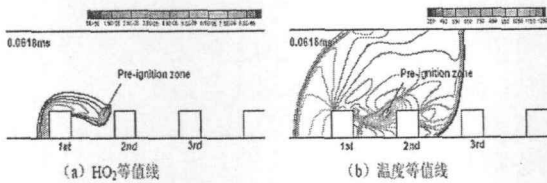


图 10 爆轰波形成过程中 H₂O₂ 组分和流场温度分布

图 11 显示了较大的障碍物间距情况下爆轰波的形成过程。由图可以看到热点起爆发生在第三个障碍物上游，第二个障碍物并没有触发了热点附近的正反馈机制。原因是障碍物间距较大，障碍物后方的气流膨胀比较强，反应气体没有达到临界起爆状态。这种状态实际上受到多种因素的影响，比如化学反应诱导时间、热力学状态和温度梯度等。由于化学反应对于温度的非线性倚赖，使得临界状态对热力学扰动非常敏感，因此热点起爆的发生具有一定的随机性，但是确实客观存在的。虽然热点起爆的临界状态很难确定，但是其物理特点是非常明确的，就是能够诱导波传播与化学反应的相互作用的状态。在这种相互作用机制控制下，流场发生了一

个正反馈过程，从而实现热点到爆轰波的转化。

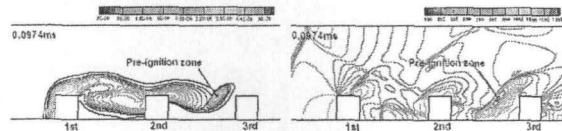


图 9 点火前时刻流场参数分布

($p_0=0.0101\text{MPa}$, $T_0=300\text{K}$, $N_2=70\%$, $ER=1$, $M=2.9$, 障碍物间距 30mm)

图 11 大障碍物间距条件下爆轰波形成过程中 H₂O₂ 组分和流场温度分布

4 爆燃波加速下的爆轰波形成

为了研究化学反应带加速的气动特性与物理机制，图 12 给出了激波与火焰相互作用问题的示意图，物理过程是由电火花产生燃烧面，然后入射激波与燃烧面相互作用诱导了火焰面的畸变与发展。

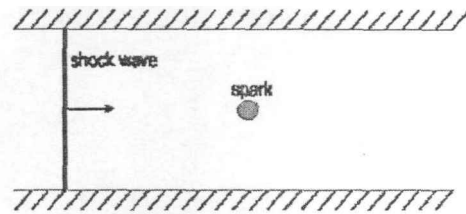


图 12 激波和火焰相互作用示意图

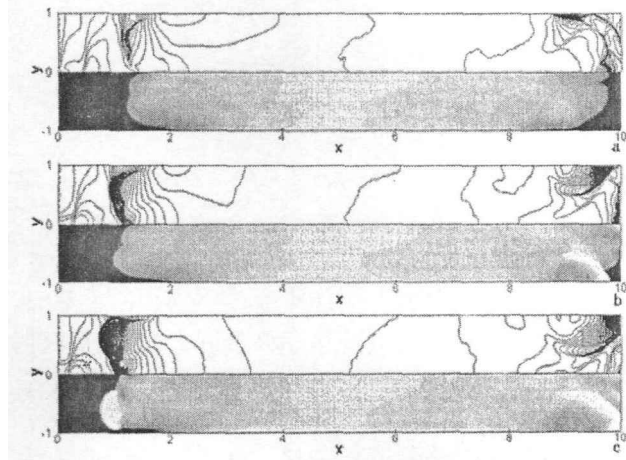


图 13 激波和火焰相互作用的压力(上)和温度(下)流场

图 13 显示了马赫数 1.6 入射激波作用下爆轰波的形成过程^[11]。由图可见在预混可燃气体中，火花点火能够形成火焰面，在入射激波的扰动下，即使激波很弱，由于 RM 不稳定性作用下，火焰面迅速发展形成爆轰波。下游波面上的爆轰波是通过热点在壁面附近的凹面上形成的，然而上游的爆轰波是在凸面上形成的，可以观察到化学反应区加速过程，与热点形成爆轰波的机理存在明显的差异。

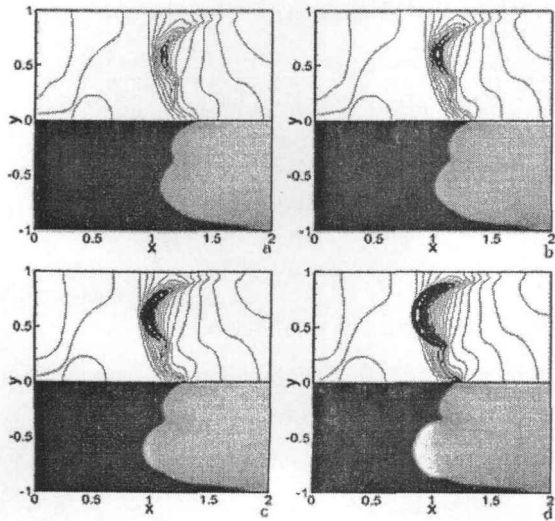


图 14 凸面上的爆燃波加速起爆的压力(上)和温度(下)流场

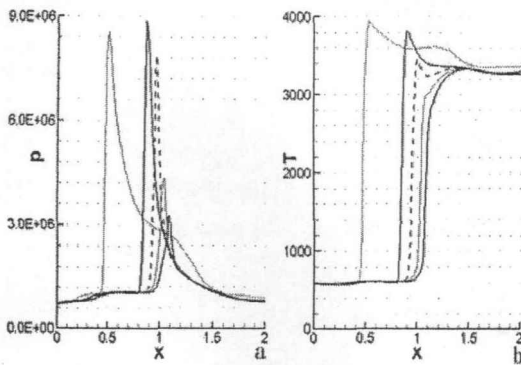


图 15 沿图 14 中的直线 $x=0.6$ 的压力和温度

图 14 显示了凸面化学反应带到爆轰波的发展过程, 可以看到与反应带相应的压缩波越来越强, 反应带的温度越来越高。一般来讲, 由于几何扩展因素的作用, 凸面压缩波应当逐渐变弱, 但是观察到的压缩波越来越强。这说明波后燃烧放热与压缩波的耦合, 即化学反应导致压缩波增强, 强压缩波反过来又促进了燃烧反应的加速, 进而发展形成爆轰波。这就是波传播与化学反应的相互作用机制。

图 15 显示了凸面化学反应带的压力和温度变化, 可以看到化学反应带的加速过程没有明显的过驱动, 爆轰波后的温度梯度很小, 没有明显的过驱动现象。但是, 它与热点起爆过程也有相同之处, 即起爆过程都涉及到波传播与和化学反应的耦合与相互作用, WPCRI 机制对于化学反应带加速形成爆轰波的过程也是适用的。传统的爆轰物理的研究中常常提到火焰面加速问题, 而火焰面总是包涵更多的物理现象, 诸如热点、湍流、旋涡等。本文提出的化学反应带概念具有更简单、更基本的特点, 适合作为研究爆轰物理的基础物理过程。

5 “超临界”和“亚临界”爆轰波传播问题

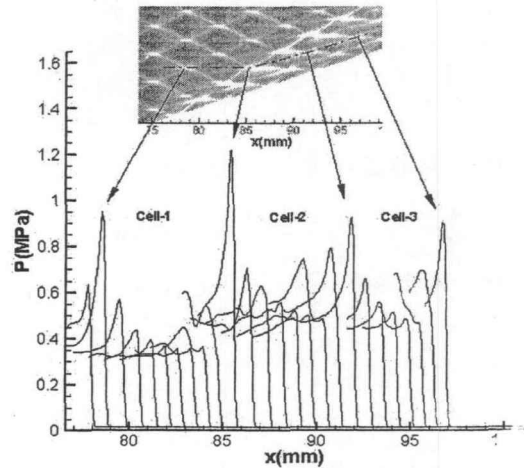


图 16 胞格爆轰波反射过程中不同时刻的压力

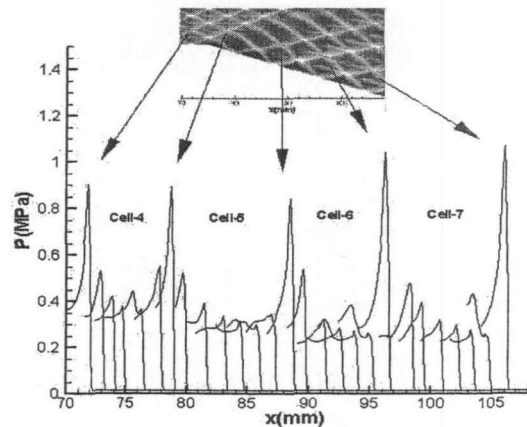


图 17 胞格爆轰波绕射过程中不同时刻的压力

为了考察临界传播状态, 本文研究了爆轰波在变截面管道中的反射和绕射两个典型传播过程, 几何域的偏角为正负 20 度。图 16 显示了反射过程中的胞格演化过程与典型胞格中心线上的压力分布^[12]。可以看到在反射作用的影响区域, 爆轰波马赫数增加, 胞格尺度变小。相对与给定的可燃气体和初始状态, 定义称之为“超临界爆轰波”。由不同时刻沿胞格中心线的波面压力可以看到发生爆轰波后每个胞格内的压力分布明显增加, 三波点峰值压力明显降低。图 17 显示了绕射爆轰波的变化特征。可以看到绕射爆轰波后胞格尺度变大, 胞格内的压力分布明显降低, 爆轰波面以较低的速度传播, 定义为“亚临界爆轰波”。但是胞格节点处三波点的压力明显提高。

近一步的分析表明: 无论超临界爆轰波或者亚临界爆轰波, 每个胞格内压力分布的某种平均值是一致的, 也就是三波点附加的压力分布与胞格中心区域的压力中心的互补, 维持了胞格平均参数的不变性。这个平均状态称为爆轰波临界传播状态。从一个胞格的发展来看, 存在着两个基本物理过程; 一个是热点起爆, 另一个是反应带运动。实际上, 三波点压力的增加必定伴随胞格中心区域压力的

降低,反之亦然。这两种基本过程相辅相成,维持了爆轰波的稳定传播。从实验测量的宏观结构来看,稳定爆轰波的状态参数是不变的,能够以 CJ 状态度量。在一个胞格的发展过程中,湍流与旋涡也有重要影响,但是相对来讲不是决定性的。

6 柱面爆轰波传播与临界胞格尺度

为了研究临界胞格尺度,本文研究了柱面爆轰波传播过程。对于给定可燃气体,由于爆轰胞格尺度具有不变性,柱面爆轰波传播过程中存在一种胞格分裂与横波自生成机制。这种特点对于研究临界胞格尺度具有重要意义,而普遍爆轰现象 DDT 过程的胞格演化太快,并具有很大随机性,给临界胞格尺度的研究带来很大困难。

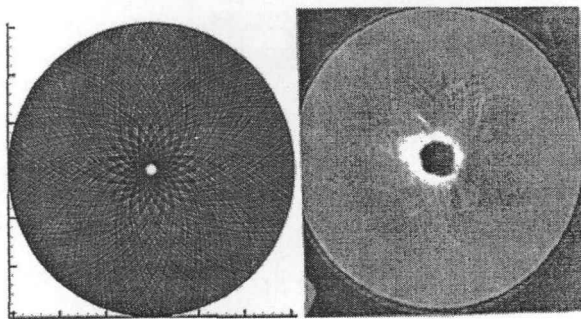


图 18 柱面爆轰扩展传播过程的胞格结构图

图 18 给出了柱面爆轰波扩展传播过程的胞格结构,其中左图是数值结果,右侧是实验结果^[13]。由图可见在传播过程中爆轰胞格不断分裂形成新的胞格,从而保持整个传播过程中胞格尺寸的基本不变。另外,计算结果与实验照片良好的一致性验证了计算结果的可行性。

图 19 给出了柱面爆轰扩展传播过程中诸多胞格分裂模式中一个典型的胞格分裂过程,由四个不同时刻爆轰波阵面的结构图表示。由图可见在 14.0 毫秒时刻,由于非均匀膨胀和 WPCRI 机制影响了前导激波和化学反应区的耦合关系,并逐渐产凹波面。具有化学反应凹波面的继续传播,波面的会聚效应相对于扩展膨胀占优,在 14.5 毫秒时刻在阵面上又逐渐形成一个热点。热点起爆效应在后继时刻的波阵面上形成一对新的三波结构,并以相反的方向运动。在图示的一个毫秒的时间尺度上,发展到临界尺度的胞格完成了一个自分裂过程,形成了新的横波结构。

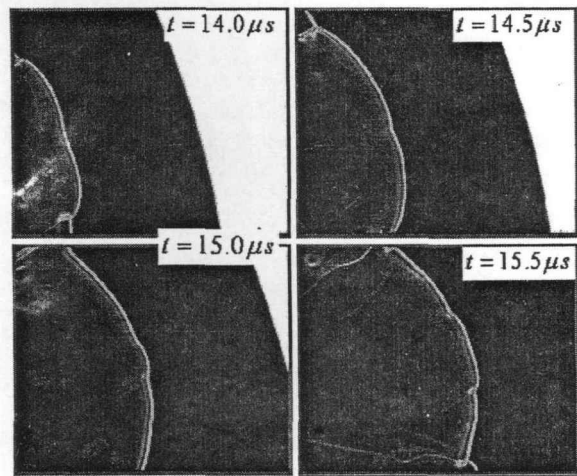


图 19 柱面爆轰扩展传播过程一个典型的胞格分裂过程

对于稳定传播的爆轰波,化学反应区将产生一系列的压缩波以维持恒定的前导激波。但是柱面爆轰波扩展传播带来的非均匀膨胀效应,使得达到临界尺度胞格的波面产生内凹反应区结构,这里反向的 WPCRI 机制起主导作用。当内凹反应区结构达到一定尺度时,内凹反应区的会聚效应超过了膨胀效应,触发了正向的 WPCRI 机制,导致了热点起爆现象,实现了爆轰胞格的一个自分裂过程。对于一个达到一定的胞格,其分裂过程是凸波面扩展膨胀与凹面反应区会聚机制竞争的结果,而临界尺度是一个特征参数。

7 气相胞格爆轰起爆与传播的统一框架理论

气相爆轰波的起爆、发展与传播过程耦合了诸多的气体动力学、热力学、化学反应动力学现象,是一个典型多尺度的复杂流动过程。在总结爆轰现象理论分析、实验观察和计算模拟方面获得的研究成果的基础上,通过考察五个典型物理算例,分析它们各自的流动特征、演化过程与物理机制,本文提出了气相规则胞格爆轰波起爆和传播的统一框架理论。该框架理论由一个关键物理机制,两个基本物理过程,三个临界状态等五个关键要素构成。其中的一个关键物理机制是波传播/化学反应带相互作用;两个基本物理过程即热点起爆和化学反应带加速过程;三个临界状态即临界传播状态、临界起爆状态和临界胞格尺度。五个典型物理算例的研究与分析界定了这五个关键要素的物理机制、表现特点及其客观存在性。

经典的 CJ 理论实际上反映了爆轰波的临界传播状态,是爆轰波宏观气动特性的一个度量。虽然 CJ 爆轰是一个理想化的物理模型,但是应用 CJ 理论预测的结果与实验结果符合良好,因为实验结果是具有复杂波结构爆轰波的状态参数在某种意义上的平均度量。ZND 理论反映的爆轰波的内在本质

是化学反应带加速和临界传播状态, 也就是 ZND 爆轰波在化学反应带加速机制的作用下, 以临界状态传播。虽然从来没有实验验证 ZND 理论反应带结构的物理存在, 但是该理论描述的反应带物理图像对于理解爆轰现象有重要的启示意义。

应用 CFD 技术和一步爆轰反应模型的一维计算结果一般是 CJ 理论的计算模型化, 而采用多步反应模型和基元反应的计算往往是 ZND 理论的体现。对于能够获得具有胞格结构的二维与三维爆轰波计算模拟, 相关的数学物理方程至少体现了统一框架理论的四个关键要素: 即波传播/化学反应带相互作用机制、热点起爆、化学反应带加速、临界传播状态。这种爆轰波能够简单地描述为: 依据 WPCRI 机制, 通过热点起爆和化学反应带加速两个基本物理过程的相互作用, 爆轰波以胞格长度为单位, 围绕临界传播状态作周期性传播。一般来讲, 能够体现上述四个关键要素的爆轰物理模型都能够给出相似的胞格结构, 但是预测正确的胞格尺度则需要考虑模拟更多的物理因素。

爆轰波起爆源于两个基本物理过程: 一个是热点起爆, 另一个化学反应带加速。这两个基本过程可以同时出现, 也可以单独诱导, 但是它们都倚赖波传播/化学反应带相互作用机制, 能够以临界起爆状态为评估特征。两种基本物理过程的本质是一样, 只是由于参与起爆的可燃气体的体量不同, 起爆强度不同而已。

实际爆轰波的传播过程也倚赖于统一框架理论的四个关键要素: 即波传播/化学反应带相互作用机制、热点起爆、化学反应带加速、临界传播状态。实验观察到的胞格爆轰都是三维的, 应用烟迹技术获得的胞格照片与二维计算结果对比表现出的差异就是证明, 但是实验照片表现出的二维特征与爆轰多波结构的关系是需要近一般分析研究的, 困难在于对于爆轰波实际空间结构的把握不够。与二维计算结果对比, 可以推论沿单个胞格中心线爆轰波状态的周期性变化的幅度应该更大, 原因是三维会聚产生的热点起爆应该更强, 扩展膨胀产生的爆轰波解藕效应也更强, 但是临界传播状态是不变的。

8 结束语

本文通过总结爆轰现象的相关研究进展, 根据中国科学院高温气体动力学重点实验室在爆轰现象方面的研究, 提出了气相规则胞格爆轰波起爆和传播的统一框架理论。应用这个爆轰波统一框架理论, 本文成功地解释了经典爆轰理论、应用 CFD 技术获得的多维爆轰波结果和实验观察到的胞格爆轰现象依据的关键物理要素。虽然爆轰波框架理论的三个临界状态需要进一步的量化研究, 但是应用框架理论解释已经获得的爆轰波研究结果的

统一性及其对深入研究爆轰现象的预测性表明了该理论对于深入开展爆轰物理研究具有重要意义。爆轰传播与起爆的核心物理机制就是波传播和化学反应相互作用, 即 WPCRI 机制。它控制了热点起爆与反应带加速两个基本物理过程的发展, 把起爆和传播过程统一起来, 是胞格爆轰统一框架理论的基石。三个临界状态参数是爆轰波的重要物理特征, 虽然具有统计平均意义, 但是气体动力学、热力学和化学反应动力学相互作用的综合度量。

参考文献:

- [1] Lee J.H.S., Knystautas R. and Yoshikawa N.. Photochemical initiation of gaseous detonations. *Acta Astronautica*, 1978, 5:971-982.
- [2] Urtiew P. and Oppenheim A.K.. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas. *Proc. Roy. Soc. A*, 1966, 295: 13-28.
- [3] Thomas G.O. and Jones A.. Some Observations of the Jet Initiation of Detonation. *Combust. Flame*, 2000, 120:392-398.
- [4] White D.R.. Turbulent structure in gaseous detonations. *Phys. Fluids*, 1961, 4: 465-480.
- [5] Gamezo V.N., Desbordes D. and Oran E.S.. Two-dimensional reactive flow dynamics in cellular detonation waves. *Shock Waves*, 1999, 9:11-17.
- [6] Pintgen F., Eckett C.A., Austin J. M. and Shepherd J.E.. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations. *Combustion and Flame*, 2003, 133: 211-229.
- [7] Jiang Z.L.. On Dispersion-controlled Principles for Non-oscillatory Shock Capturing Schemes. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20: 1-15.
- [8] Kee R.J., Rupley F.M., et al. Chemkin-II: a fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical and plasma kinetics. UC-405, Sandia National Laboratories, 1996.
- [9] 滕宏辉. 气相爆轰波形成和传播机制的基础问题研究. 博士学位论文, 中国科学院力学研究所, 2008.
- [10] 王春, 张德良, 姜宗林. 多障碍物通道中激波诱导气相爆轰的数值研究, *力学学报*, 2006:38: 586-592.
- [11] Teng H., Jiang Z., Hu Z.. Detonation initiation developing from the Richtmyer- Meshkov Instability. *Acta Mechanica Sinica*, 2007, 23: 343-349.
- [12] 邓博, 胡宗民, 滕宏辉, 姜宗林. 变截面管道中爆轰胞格演变机制的数值模拟研究, *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 206-216.
- [13] Jiang Z., Han G., Wang C. and Zhang F.. Self-organized generation of transverse waves in diverging cylindrical detonation, *Combustion and Flame*, 156, 1653-1661, 200