

用于推进的三种爆轰波的结构特征*

范宝春[†] 张旭东 潘振华 归明月

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094

摘要 爆轰发动机研究的关键技术之一是如何将其控制在燃烧室内. 根据控制手段的不同, 爆轰发动机可大致分为: 驻定爆轰发动机、脉冲爆轰发动机和旋转爆轰发动机. 存在于燃烧室的爆轰, 在宏观和精细结构以及自持机理等方面皆不同于 CJ(Chapman Jouget) 理论为基础的经典爆轰. 本文将对此类无害爆轰的特征结构进行分析、比较与评述, 这对了解爆轰理论和研制爆轰发动机是有益的.

关键词 结构特征, 推进, 爆轰发动机, 经典 CJ 理论, 自持机理

1 引言

在预混可燃介质中, 由激波诱导的、以稳定方式传播的燃烧称为爆轰波. 由于该燃烧的化学反应更为激烈, 故具有极高的火焰传播速度, 其产物也具有极高的温度和压力. 因此, 爆轰是一种具有更高热效率的燃烧方式, 但也是一种“稍纵即逝”, 不易控制的燃烧方式. 显然, 如果能对其实现有效控制, 使之成为无害爆轰, 将具有广泛的应用前景.

Humphrey^[1] 最早提出爆轰波用于推进的设想, 但直到最近, 由于各种无害爆轰的实现, 爆轰发动机的研究才出现重大进展. 爆轰发动机研究的关键技术之一是如何将其控制在燃烧室内. 研究表明, 通过驻定、循环脉冲和绕轴旋转的方式可将爆轰波限制在发动机的燃烧室内. 据此, 爆轰发动机分为: 驻定爆轰发动机 (standing detonation wave engine, SDWE)、脉冲爆轰发动机 (pulse detonation engine, PDE) 和旋转爆轰发动机 (rotating detonation engine, RDE).

爆轰发动机研究中, 最受关注的是 PDE, 其工作方式是间歇的, 即爆轰波在燃烧室内循环出现, 每个循环通常包括进气、点火、爆轰波的形成、爆轰的传播、爆轰波的泄出、膨胀波的回传和再进气等若干环节. 与其他推进爆轰相比, 脉冲爆轰可以实现零启动, 即静止环境中启动, 因此, 无论实

验室研究或实际使用都比较容易实现, 因此得到广泛关注. 从应用角度讲, 即使实现了高频脉冲爆轰, 但需解决的问题仍相当多, 人们还须对与发动机相关的问题, 如进气道、喷管、高温和噪音、高频点火的方式和器件、工作效率等进行进一步的研究^[2-10]. 此外, 稳定循环的脉冲爆轰, 其传播环境是复杂的, 波前状态是流动的、不均匀的、非大气条件的. 关于这些扰动的影响, 虽有一些初步探讨^[11-14], 却远未能够揭示其本质, 困难在于, 迄今还找不到记录其结构信息的合适方法. 因此, 人们对脉冲爆轰的精细结构, 自持机理以及其本征参数等知之甚少.

高超音速的可燃气流, 在障碍物作用下, 可形成驻定于该障碍物的爆轰波, 从而使高超音速的可燃气体, 在无附加点火源的情况下实现瞬间燃烧. 据此设计的 SDWE, 结构简单, 体积小, 能量利用率高^[15-17]. 由于爆轰波须在高超音速气流中驻定, 因此, 实验研究时, 对设备的要求较高. 但驻定爆轰 (standing detonation wave, SDW) 一经形成, 其信息采集相对容易. 此外, 形成驻定爆轰的方式较多, 包括固定尖劈^[18-20]、飞行的尖锥^[21-22]、钝体和球^[23-25], 以及正爆轰在不同介质中的透射诱导的斜爆轰, 故 SDW 结构的研究进行得比较广泛和深入. 人们通过实验图象和数值结果^[26-29], 讨论了附体和脱体斜爆轰的结构特征、触发和自持

收稿日期: 2010-08-30, 修回日期: 2011-07-12

* 国家自然科学基金项目 (10872096) 资助

[†] E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn

机理, 以及运动物体的壁面长度和球直径等对形成稳定斜爆轰(而非爆轰与激波的复合阵面)的影响。

旋转爆轰发动机既不像 SDWE 需要高速来流, 也不像 PDE 需要高频点火, 它在某种程度上结合了 PDE 和 SDWE 的特点. 对于燃烧室中的空间某点, 与 PDE 一样, 旋转爆轰波是脉冲出现的; 如果将坐标建立在爆轰波面上, 与 SDWE 一样, 旋转爆轰的流场是定常的. 因此在爆轰发动机研究中, 旋转爆轰的研究具有一定的优势. 旋转爆轰的研究始于 1959 年^[30-31], 此后, 人们在不同大小和形状的燃烧室内, 对各种燃料中的旋转爆轰进行了实验研究^[32-37]. 实验时, 可根据压力测试结果判断旋转的稳定性, 但在流场可视化方面, 只能拍摄其扫描照片, 包含的爆轰波结构的信息非常有限. 计算也大都局限于二维^[38-40].

经典爆轰以 CJ(Chapman Jouget) 理论为基础, 研究静止的、状态均匀的可燃介质中传播的爆轰. 显然, 上述的存在于燃烧室内的爆轰波, 无论是驻定爆轰、脉冲爆轰还是旋转爆轰, 都已超出经典爆轰讨论的范围, 其宏观和精细结构以及其自持机理都具有自身的特点. 本文的侧重点不是评述各种爆轰发动机优劣及其研究进展, 而是根据爆轰波研究的现状, 分析、比较与评述用于推进的爆轰波的结构特征及自持机理, 这对开拓爆轰理论和研制爆轰发动机是有益的。

2 脉冲爆轰

当爆轰的脉冲循环稳定时, 其传播环境是复杂的, 波前状态是流动的、不均匀的、非大气的. 由于迄今还没有记录脉冲爆轰结构信息的合适方法, 故人们对脉冲爆轰的精细结构, 自持机理以及本征参数等知之甚少. 为使问题简化, 可从相关的基本情形入手, 如讨论流动系统的爆轰、剪切或旋涡对爆轰的作用等, 以探讨波前气流可能产生的影响。

图 1 为研究流动系统中爆轰传播特性的实验装置示意图^[11]. 从左向右传播的激波导致管内可燃气体(等当量比的氢氧混合物)的定向流动. 此后, 由垂直爆轰管传入管内的爆轰波(管长 620 mm), 在流动气流中分别向上游和下游两个方向传播. 5 个压力传感器记录流场的压力变化, 其结果如图 2 所示. 显然, 向上游传播的爆轰的压力高于向下游传播的情形。

图 3 为烟箔记录的流动系统中的爆轰胞格. 其中 (a) 为面向上游的爆轰, (b) 为面向下游的爆轰. 显然, 流动导致爆轰胞格的变化, 面向上游的爆轰胞格小于面向下游的爆轰。

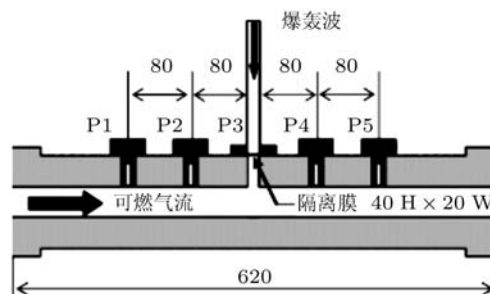


图 1 流动系统爆轰特性实验研究示意图^[11] (单位: mm)

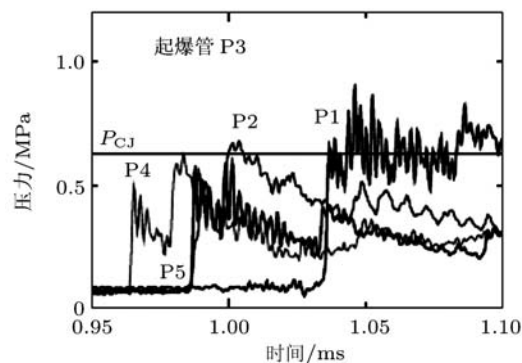
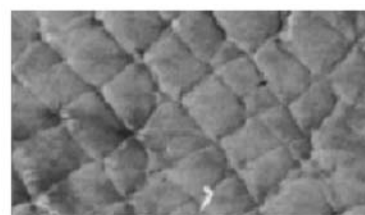
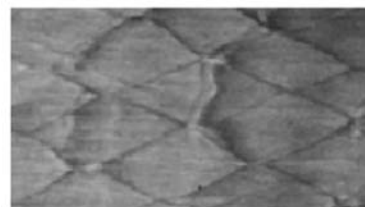


图 2 流动系统爆轰压力测试曲线^[11]



(a) 面向上游



(b) 面向下游

图 3 流动系统的爆轰胞格^[11]

作者对此进行了数值研究^[14], 图 4 为管内流场的压力分布图. 面向上游的爆轰波, 即阵面元

a , 爆压为 16.8 MPa, 爆速为 1986 m/s; 横向传播的爆轰波, 即阵面元 b , 爆压为 1.38 MPa, 爆速为 1960 m/s (接近 CJ 爆速); 面向下游的爆轰波, 即阵面元 c , 爆压为 1.19 MPa, 爆速为 1960 m/s. 因此, 向上游传播的爆轰波, 其强度高于向下游传播的情形, 这与实验结果一致.

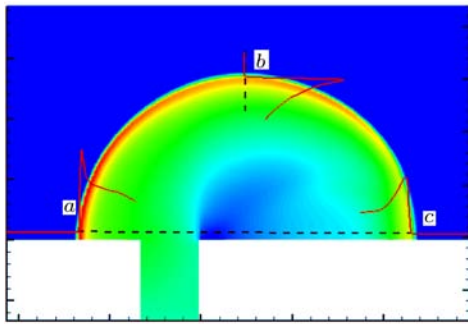


图 4 流动系统爆轰流场的压力分布^[14]

3 驻定斜爆轰

当可燃气体与尖劈间的相对运动速度足够高时, 可形成驻定于尖劈的爆轰波, 称为驻定斜爆轰 (SDW). 驻定斜爆轰不同于经典的平面爆轰, 对应于不同的形成条件, 具有不同结构的流场. 图 5 为斜爆轰的极曲线, 横轴为气流折转角 (即尖劈半角), 竖轴为激波倾斜角^[18]. 图 5 中, 实线为引导激波, 虚线表示反应结束面. 当法向来流速度为 CJ 爆速时, 称为 CJ 点, 对应的爆轰倾斜角和气流折转角分别为 β_{CJ} 和 θ_{CJ} . 当尖劈角大于临界值 $\theta_{det,eq}$ 时, 爆轰波将脱体.

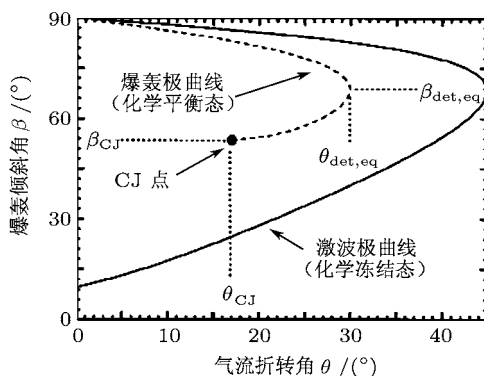
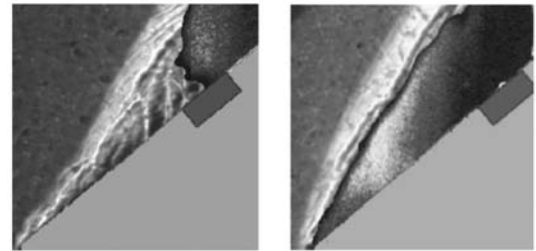


图 5 斜爆轰极曲线^[18]

3.1 附体驻定斜爆轰

尖劈角小于临界值 $\theta_{det,eq}$ 时, 爆轰波将附着在尖劈上, 图 6 为附体驻定斜爆轰的实验照片, 此图

为纹影和 OH PLIF 的叠加照片. 对于有限速率的反应, 激波后存在点火诱导区. 如果诱导特征时间近似于流动特征时间, 劈尖附近存在明显的无反应的诱导区域, 此时, 驻定爆轰如图 6(a) 所示. 如果诱导特征时间远小于流动特征时间, 激波作用下可立即反应, 且无显著的点火诱导区域存在, 如图 6(b) 所示.

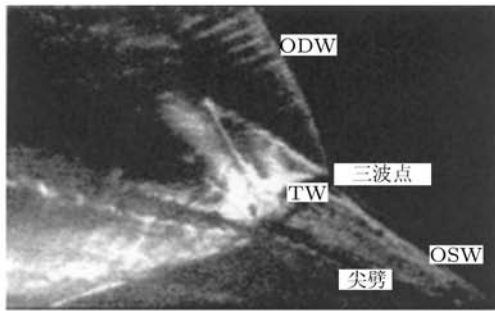


(a) 显著的点火诱导区 (b) 无显著点火诱导区

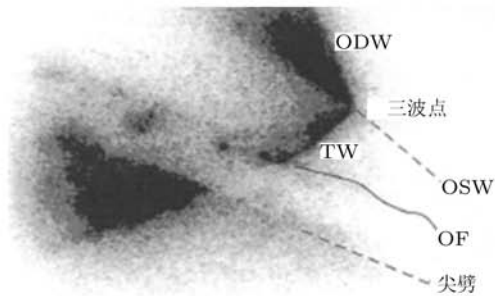
图 6 附体驻定斜爆轰的实验照片^[19]

关于图 6(a) 所显示的驻定斜爆轰, 进一步的讨论可参见图 7. 图 7(a) 为纹影图, (b) 为 OH PLIF 图, (c) 为根据实验照片绘制的驻定斜爆轰的结构示意图. 在劈尖附近, 尖劈诱导的激波未能使可燃物直接点火, 为惰性斜激波, 记作 OSW (oblique shock wave). OF 为 OSW 诱导的火焰阵面, 它与激波是解耦的. OSW 的下游, 为斜爆轰波, 记作 ODW, 其倾斜角 θ_D 大于惰性激波的倾斜角 θ_c , 故其强度也大于惰性激波, 从而能使波后立即反应. 在反应放热的作用下, 引导激波的倾斜角大于 θ_c . ODW 和 OSW 的碰撞点, 称三波点, 记为 T , T 点的反射激波记作 TDW (transverse detonation wave). 可燃来流经 OSW 压缩后, 部分气流于 OF 上燃烧, 还有部分气流则流经 TDW, 因受到二次压缩而立即反应, 故 TDW 为横向爆轰波. TDW 波后的高温爆轰产物将有助于点燃 ODW 波后在 T 点附近的可燃气体, 使其强度增加, 直至反应与激波耦合, 从而形成稳定的驻定斜爆轰. TDW 与 OF 的交点为 F 点, TDW 在该点透射后, 衰减为惰性的横向激波, 记作 TSW (transverse shock wave). 经 TDW 压缩的气体和经 TSW 压缩的气体之间存在接触间断, 记作 SL.

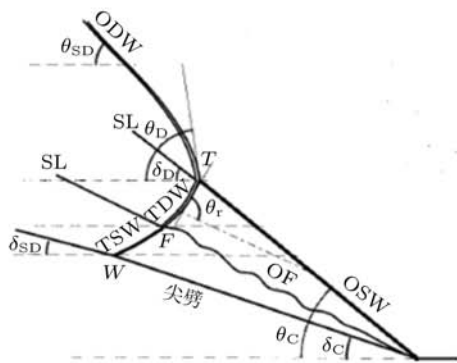
ODW 的稳定性与可燃气体的化学活性有关. 低活化能时, 波阵面是稳定的, 阵面比较光滑; 对于中等活化能, 阵面会出现规则精细结构; 而对于高活化能, 则为不规则的精细结构.



(a) 纹影图



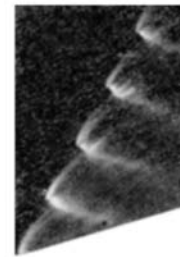
(b) OH PLIF 图



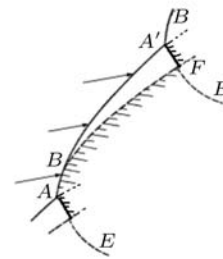
(c) 结构示意图

图 7 附体驻定斜爆轰的基本结构 [19]

以规则精细结构的斜爆轰阵面为例，图 8(a) 为精细结构的纹影照片，(b) 为根据 (a) 绘制的结构示意图。弯曲的引导激波阵面 AA' 和 $A'B$ 碰撞于 A' ，其反射波 $A'F$ 。来流经激波 AA' 作用后，部分于火焰阵面 AF 燃烧，部分流经 $A'F$ ，因二次压缩而燃烧，故 $A'F$ 为横向爆轰波，这种反复出现的横向爆轰波使驻定斜爆轰得以稳定。值得注意的是，对于平面正爆轰，横向传播的反射激波与反应无关。(c) 为作者计算的胞格结构，由于横向爆轰波皆面向上游，且传播方向一致，故三波点的轨迹为平行直线 [29]。



(a) 实验照片



(b) 结构示意图



(c) 计算胞格

图 8 驻定斜爆轰的精细结构 [20,29]

3.2 脱体驻定爆轰

尖劈角大于临界值 $\theta_{det,eq}$ 时，驻定爆轰波将脱体，其阵面结构取决于达姆科勒数 D_a (流动特征时间与反应特征时间之比)。仅 D_a 较大时，才会出现激波诱导的燃烧和驻定斜爆轰波。图 9 为壁面有限长的锥形飞行弹丸，尖劈角大于临界值时，在可燃气体中形成脱体驻定爆轰。其中图 9(a) 为纹影图，(b) 为 OH PLIF 图，(c) 为根据实验照片绘制的结构示意图。

显然，爆轰阵面可分为如下几部分

(1) 强过驱正爆轰 ($0 \leq \beta \leq \beta_1$)

尖劈前轴线附近为过驱正爆轰，爆轰阵面脱体，并与轴线垂直。波前来流速度大于 CJ 爆速，波后为亚音速。通过爆轰阵面的气流折转角几乎为零，但沿弹丸壁面，气流方向改变很大。壁面具有很强的压缩效应，使气体加速，并逼近音速。 β_1 处，波后气流为音速。沿爆轰阵面向下游移动，爆轰波倾斜角略有减少。

(2) 弱过驱斜爆轰 ($\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$)

当 $\beta > \beta_1$ 时, 波后气流为超音速, 但法向为亚音速. 由于壁面压缩效应减弱, 以及弹丸肩部因外折角产生的膨胀稀疏波, 从而使爆轰波减弱, 爆轰阵面弯曲, 其倾斜角逐渐减小.

(3) 准 CJ 爆轰 ($\beta_2 \leq \beta < \beta_{CJ}$)

在 $\beta_2 \leq \beta < \beta_{CJ}$ 区间, 波后气流为超音速, 但法向基本逼近音速. 稀疏波的影响逐渐减小, 爆轰阵面的倾斜角也逼近 β_{CJ} .

(4) CJ 爆轰 ($\beta = \beta_{CJ}$)

当爆轰阵面的倾斜角等于 β_{CJ} 时, 阵面已离弹丸较远, 波后法向速度为音速, 不再受稀疏波影响. 此时, 爆轰阵面不再弯曲, 其法向来流速度为 CJ 爆速.

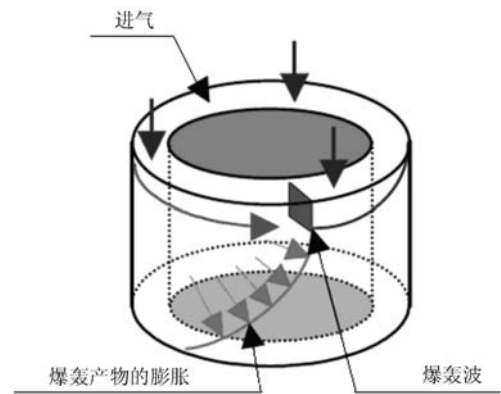


图 10 旋转爆轰的环形燃烧室

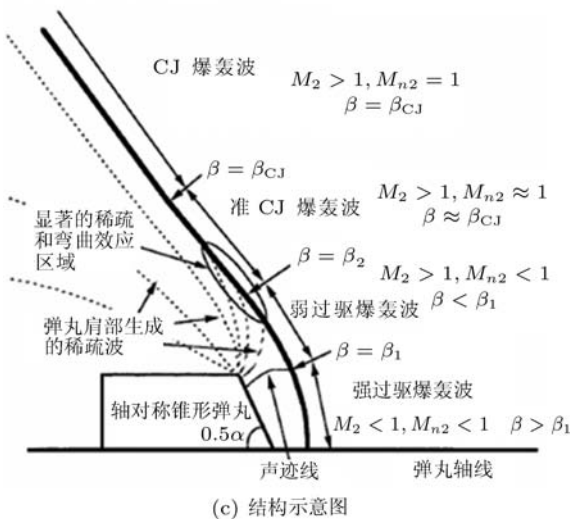
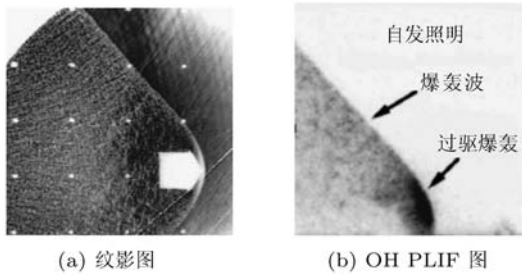


图 9 脱体驻定斜爆轰的基本结构 [21]

4 旋转爆轰

旋转爆轰通常在图 10 所示的环形燃烧室中形成, 可燃气体由上底面注入. 爆轰波传播时, 其波前压力总小于供气系统的压力, 于是总有预混气注入, 形成提供爆轰波绕轴旋转的燃料层. 爆轰波后, 爆轰产物由下底面的出气端泄出, 除产生推力

外, 还形成了可燃气体注入的空间.

具有内外壁的环形圆筒, 给流场的实验显示带来相当大的困难. 迄今为止, 人们只能通过外壁的狭缝, 拍摄扫描照片. 图 11 为旋转爆轰的扫描图像, 其中图 11(a) 为实验照片, (b) 为计算扫描图.

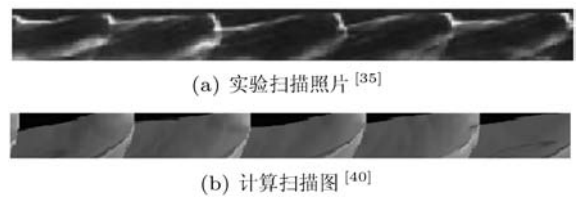


图 11 旋转爆轰扫描照片

稳定旋转的爆轰应具有恒定的角速度, 于是爆轰阵面沿径向各点的传播线速度是不一致的, 即爆轰阵面上的爆速是不一致的, 这不同于经典的 CJ 爆轰, 应具有特殊的自持旋转的机理.

图 12 为作者 [29] 给出的爆轰旋转时, 底壁的爆轰胞格, 其中图 12(a) 为实验结果, (b) 为计算结果. 显然, 外侧的胞格远小于内侧的胞格. 对于圆环型管道, 外壁面为凹型收敛壁面, 对流场有压缩作用, 从而使爆轰波增强, 胞格尺寸减小; 而内壁为凸型发散壁面, 使爆轰波减弱, 胞格尺寸变大. 因此, 内外壁的敛散作用, 使旋转爆轰波自持.

根据以上分析, 旋转爆轰的流场应当是三维的. 图 13 为旋转爆轰的三维流场. 旋转爆轰阵面由子爆轰波和透射激波组成, 是一种稳定传播的复合阵面.

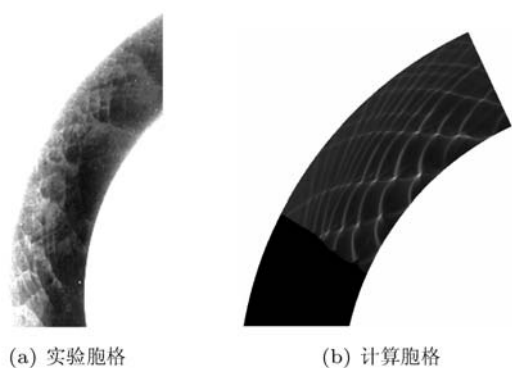
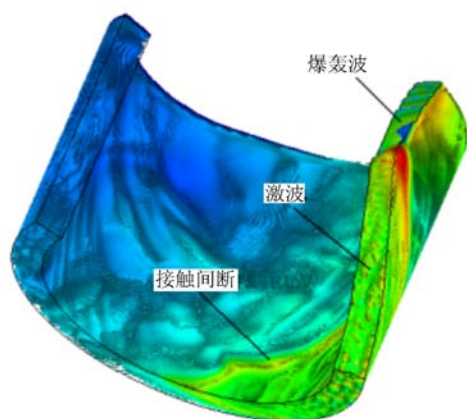
图 12 旋转爆轰的胞格结构^[40]

图 13 旋转爆轰的三维流场

图 14 为不同半径处的流场剖面图, 从右向左, 分别为内壁面、中心和外壁面. 结果表明, 外壁面的爆轰阵面的高度最低, 强度最大. 内壁面最高, 强度最低.

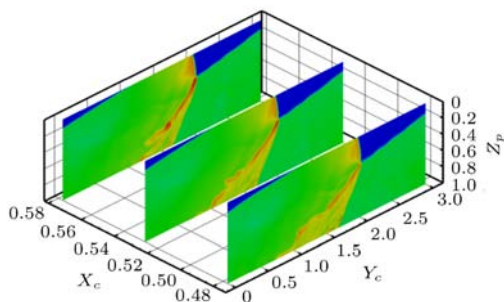


图 14 旋转爆轰的流场剖面

5 结 语

爆轰波可以通过驻定、循环脉冲和绕轴旋转的方式存在于发动机的燃烧室内, 这使爆轰发动机的开发和研制成为可能.

对于脉冲爆轰, 由于实验与计算方面的困难, 其特性的研究远未深入, 迄今尚未给出合理的描述. 人们只能对与其相关的情形进行研究, 如讨论流动对爆的影响, 结果表明, 面向上游的爆轰较面向下游的强, 胞格较后者小.

对于驻定爆轰 SDW, 当尖劈角小于临界角时, 爆轰波附体, 阵面通常包括斜激波 OSW 和斜爆轰波 ODW 两部分. 两者间的反射波使预压气体燃烧, 从而成为横向爆轰波 TDW. 如果 TDW 均为面向上游的爆轰波, 则其胞格为平行直线. 尖壁角大于临界角时, 爆轰波脱体, 形成爆轰复合波系. 滞止线附近为过驱正爆轰, 此后, 随阵面向下游延展, 形状逐渐弯曲, 强度逐渐衰减, 直至 CJ 爆轰后, 才保持一定的倾斜角.

对于旋转爆轰 RDW, 内外壁面的敛散性使外侧爆轰强于内侧, 从而使之稳定旋转. 进气端在压力衰减为临界值时, 开始进气, 在阵面前形成三角状的未燃气体层, 从而将爆轰波限制在上底壁附近的局部区域. 爆轰波的下侧与斜激波相连, 形成爆轰-激波的复合波系.

爆轰的主要特征之一是能够自持, 这与爆轰的精细结构有关. 自持时的爆轰参数是非常有价值的, 因为它是判定和评估爆轰的本征值. 推进爆轰波具有特殊的宏观和精细的结构及自持机理, 也具有特定的本征值, 这是经典的 CJ 爆轰理论未曾涉及的. 推进爆轰涉及的基本科学问题分为两类, 一是波前流场状态, 如流动、剪切、旋涡、湍流以及流场非均匀或非均相性等对其间传播的爆轰的宏观和精细的结构及自持机理的影响; 一是边界, 如边界形状、输运效应、化学活性以及敛散性等对爆轰的影响. 相关的实验和数值研究皆远未深入, 但此类研究对于爆轰理论的开拓和爆轰发动机研制是有益的.

参 考 文 献

- 1 Humphrey H A. An internal-combustion pump and other applications of a new principle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1909, 77: 1075-1200
- 2 Bussing T, Hiukey J B, Kaye L. Pulse detonation engine Preliminary design considerations. AIAA paper 1994-3220, 1994
- 3 Roy G E, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Prog Energy Combust Sci*, 2004, 30(6): 545-672
- 4 Nikitin V F, Dushin V R, Phylippov Y G, et al. Pulse detonation engines: technical approaches. *Acta Astron*, 2009, 64(2-3): 281-287
- 5 Brophy C M, Sinibaldi J O, Damphousse P. Initiator performance for liquid-fueled pulse detonation engines. AIAA

- paper 2002-0472, 2002
- 6 Ciccarelli G, Johansen C, Hickey M C. Flame acceleration enhancement by distributed ignition points. *J Prop Power*, 2005, 21(6): 1029-1034
 - 7 Jackson S I, Shepherd J E. Detonation initiation in a tube via imploding toroidal shock waves. *AIAA J*, 2008, 46(9): 2357-2367
 - 8 Owens Z C, Hanson R K. Single-cycle unsteady nozzle phenomena in pulse detonation engines. *J Prop Power*, 2006, 23(2): 325-337
 - 9 Zhu D, Fox D S, Miller R A, et al. Effect of surface impulsive loads on fatigue behavior of constant volume propulsion engine combustor materials. *Surface Coatings Tech*, 2003, 188-189: 13-19
 - 10 Caldwell N, Glaser A, Gutmark E. Acoustic measurements of multiple pulse detonation engines firing out of phase. AIAA paper 2007-0445, 2007
 - 11 Ishii K, Kataoka H, Kojima T. Initiation and propagation of detonation waves in combustible high speed flows. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 2323-2330
 - 12 Vasilev A A, Zvegintsev V I, Nalivaichenko D G. Detonation waves in a reactive supersonic flow. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, 42(5): 568-581
 - 13 Yi T H, Wilson D R, Lu F K. Numerical study of unsteady detonation wave propagation in a supersonic combustion chamber. Paper No.10041, 25th International Symposium on Shock Waves, Bangalore, India, 2004. 17-22
 - 14 潘振华, 范宝春, 归明月, 等. 流动系统中爆轰波传播特性的数值模拟. *爆炸与冲击*, 2010, 30(6): 593-597
 - 15 Cambier J L, Adelman H, Menees G P. Numerical simulations of an oblique detonation wave engine. *J Prop Power*, 1990, 6(3): 315-323
 - 16 Ashford S A, Emanuel G. Oblique detonation wave engine performance prediction. *J Prop Power*, 1996, 12(2): 322-327
 - 17 Sislian J P, Schirmer H, Dudebout R, et al. Propulsive performance of hypersonic oblique detonation wave and shock-induced combustion ramjets. *J Prop Power*, 2001, 17(3): 599-604
 - 18 Morris C I, Kamel M R, Hanson R K. Shock-induced combustion in high-speed wedge flows. In: Proc. 27th Symp on Combustion, 1998. 2157-2164
 - 19 Viguier C, Gourara A, Desbordes D. Three-dimensional structure of stabilization of oblique detonation wave in hypersonic flow. In: Proc. 27th Symp on Combustion 1998. 2207-2214
 - 20 Berlyand A T, Vlasenko V V, Svishchev S V. Stationary and nonstationary wave structures that arise in stabilization of detonation over a compression surface. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2001, 37(1): 82-98
 - 21 Kasahara J, Fujiwara T, Endo T, et al. Chapman-Jouguet oblique detonation structure around hypersonic projectiles. *AIAA Journal*, 2001, 39(8): 1553-1561
 - 22 Kamel M B, Morris C I, Stouklov I G, et al. PLIF Imaging of hypersonic reactive flow around blunt bodies. In: Proc. 26th Symp on Combustion, 1996. 2909-2915
 - 23 Kasahara J, Arai T, Chiba S, et al. Criticality for stabilized oblique detonation waves around spherical bodies in acetylene/oxygen/krypton mixtures. *Proc Combust*, 2002, 29: 2817-2824
 - 24 Maeda S, Inada R, Kasahara J, et al. Visualization of the non-steady state oblique detonation wave phenomena around hypersonic spherical projectile. *Proc Combust*, 2011, 33(2): 2343-2349
 - 25 Choi J Y, Kim D W, Jeung I S, et al. Cell-like structure of unstable oblique detonation wave from high-resolution numerical simulation. *Proc Combust*, 2007, 31: 2473-2480
 - 26 Choi J Y, Shin E, Jeung I S. Unstable combustion induced by oblique shock waves at the non-attaching condition of the oblique detonation wave. *Proc Combust*, 2009, 32: 2387-2396
 - 27 Papalexandris M V. A numerical study of wedge-induced detonations. *Combustion and Flame*, 2002, 120: 526-538
 - 28 Kaneshige M J. Gaseous detonation initiation and stabilization by hypervelocity projectiles: [Ph D Theses]. California: California Institute of Technology, 1999
 - 29 Gui M Y, Fan B C, Dong G. Periodic oscillation and fine structure of wedge-induced oblique detonation waves. *Acta Mechanica Sinica*, 2011, 27(6): 922-928
 - 30 Nicholls J A, Dabora E K, Gealler R A. Studies in connection with stabilized gaseous detonations waves. *Proc Combust*, 1959, 11: 766-772
 - 31 Voitsekhovskii B V. Stationary detonation. *Doklady USSR Academy Sci*, 1959, 129(6): 1254-1256
 - 32 Bykowski F A, Mitrofanov V V, Vedernikov E F. Continuous detonation combustion of fuel-air mixtures. *Combustion. Explos. Shock Waves*, 1997, 33: 344-353
 - 33 Bykovskii F A, Zhdan S A, Verdernikov E F. Continuous spin detonation in ducted annular combustors. In: Roy G, Frolov S. eds. Application of Detonation to Propulsion, Torus Press, Moscow, 2004. 174-179
 - 34 Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Realization and modeling of continuous spin detonation of a hydrogen-oxygen mixture in flow-type combustors. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, 45(6): 716-728
 - 35 Lentsch A, Bec R, Serre L. Overview of current French activities on PDRE and continuous detonation wave rocket engines. AIAA 2005-3232, 2005
 - 36 Wolanski P, Kindracki J, Fujiwara T. An experimental study of small rotating detonation engine. In: Roy G, Frolov S, Sinibaldi J. eds. Pulsed and Continuous Detonations. Moscow: Torus Press, 2006. 332-338
 - 37 Daniau E, Falempin F, Getin N, et al. Design of a continuous detonation wave engine for space application. AIAA 2006-4794, 2006
 - 38 Hishida M, Fujiwara T, Wolanski P. Fundamentals of rotating detonations. *Shock Waves*, 2009, 19: 1-10
 - 39 Zhdan S A, Bykovskii F A, Vedernikov E F. Mathematical modeling of a rotating detonation wave in a hydrogen-oxygen mixture. *Combustion, Explosion, Shock Waves*, 2007, 43: 449-459
 - 40 Pan Z H, Fan B C, Zhang X D, et al. Wavelet pattern and self-sustained mechanism of gaseous detonation rotating in a coaxial cylinder. *Combustion and Flame*, 2011, 158(11): 2220-2228

FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF THREE TYPES OF DETONATION WAVES UTILIZED IN PROPULSION*

FAN Baochun[†] ZHANG Xudong PAN Zhenhua GUI Mingyue

Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract How to confine detonations in a combustor is one of key issues in the study of detonation engines. Based on the controll schemes, the detonation engines can be divided into oblique detonation wave engine (ODWE), pulsed detonation engine (PDE) and rotating detonation engine (RDE). The detonation confined in the combustor is different with that described by the classic CJ theory in the aspects of general and fine structures and its self-sustaining mechanisms. In the present paper, analysis, comparison and review are performed on the fundamental structures of harness detonations, which is of help for the understanding and research on detonation engines.

Keywords fundamental characteristics, propulsion, detonation engines, classic CJ theory, self-sustaining mechanisms

* The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (10872096).

[†] E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn