中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 11 期: 114711
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

高超声速分层气流对斜爆轰起爆特征的影响

姚克鹏[1], 廖文彬[1,2], 韩桂来[1,2*]

1. 中国科学院力学研究所, 空天飞行高温气动全国重点实验室, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 工程科学学院, 北京 100049
*联系人, E-mail: hanguilai@imech.ac.cn

收稿日期: 2025-12-17; 接受日期: 2026-02-10; 网络出版日期: 2026-10-08
国家自然科学基金(编号: 12132017, 12441203)、国家重点研发计划(编号: 2022YFB3207000)、中国科学院青年交叉团队(编号: JCTD-2022-02)和中国科学院青年创新促进会(编号: 2020019)资助项目

摘要 斜爆轰属于典型的预混燃烧形式, 爆轰波前可燃气体的当量比、均匀性等特性对斜爆轰波的起爆特征有重要影响. 外喷式斜爆轰发动机将燃料喷注系统耦合于进气道系统以增加燃料与高速空气来流的混合演化长度, 但可能导致燃料穿透深度无法覆盖斜爆轰发动机燃烧室高度. 本文采用基于基元反应模型的二维Navier-Stokes方程与Euler方程研究了燃料难以覆盖斜爆轰发动机燃烧室而导致的气流分层效应对斜爆轰起爆特征的影响规律. 研究发现, 邻近斜爆轰楔面一侧气流为空气时, 斜爆轰的起爆距离随分层厚度增加而增加, 但其对起爆结构几乎无影响. 而当该层气体为低当量比可燃气时, 随着当量比的减小, 起爆距离同样逐渐增加. 不同的是, 这一情况可能诱导斜爆轰起爆结构由突变型向渐变型转变, 这主要因为斜爆轰起爆结构受其上游化学反应面的演化影响严重, 分层当量比变化直接调控斜激波下游化学反应面的结构特征. 本文着重分析分层气体特征对斜爆轰起爆特征的影响规律, 旨在为斜爆轰发动机的燃烧室与进气道系统的匹配设计提供思路.

关键词 斜爆轰, 分层气体, 起爆特征, 当量比, 斜爆轰发动机

PACS: 47.40.Ki, 47.55.HD, 47.40.Rs

1 引言

爆轰波是一种超声速自持传播的极端燃烧现象, 其产物具有高温高压特性[1,2], 可以作为大型激波风洞的驱动源[3], 也可用于推进系统的燃烧组织[4–6]. 相较于常规的等容燃烧和等压燃烧, 使用爆轰燃烧的动力推进系统具备更高的循环热效率. 爆轰发动机还具有激波压缩自点火、能量释放速率快、结构简单、高比冲等特点, 受到国内外航空航天领域众多学者的广泛关注[7–13]. 现有的爆轰发动机概念可分为三类: 脉冲爆轰发动机(Pulse Detonation Engine, PDE)、旋转爆轰发动机(Rotating Detonation Engine, RDE)和斜爆轰发动机(Oblique Detonation Engine, ODE)[10,14,15]. 决定爆轰燃烧能够走向实际工程应用的关键是实现爆轰的可靠起爆以及可控稳定传播, 这也是近百年来爆轰物理及其推进技术研究的关键问题之一.

引用格式: 姚克鹏, 廖文彬, 韩桂来. 高超声速分层气流对斜爆轰起爆特征的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 114711
Yao K, Liao W, Han G. Effect of hypersonic stratification gas inflow on the initiation characteristics of oblique detonation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 114711, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0635

© 2026《中国科学》杂志社

斜爆轰发动机利用斜爆轰波进行燃烧组织. 前人针对斜爆轰的研究为斜爆轰发动机设计提供了诸多思路. 一方面, 斜爆轰波的起爆结构根据斜激波与斜爆轰波的过渡形式划分为突变型起爆结构与渐变型起爆结构[16,17], 其主要由来流马赫数、楔面角度等因素决定, 而这些因素也同步影响斜爆轰的起爆距离. 研究人员通过考察高速来流的静温、静压、速度以及楔面结构等因素对斜爆轰起爆距离及起爆特征的影响规律, 为斜爆轰发动机燃烧室的设计及其与进气道的匹配需求提供了重要参考. 另一方面, 根据斜爆轰极曲线特征计算斜爆轰的驻定窗口, 这对斜爆轰发动机燃烧室的设计提供了指导. 研究人员通过研究不同燃烧室构型, 发现斜爆轰的理论驻定窗口可通过改变燃烧室构型进一步扩大. 比如, 利用楔面拐角诱导的膨胀波与斜爆轰波起爆区相互作用使脱体斜爆轰波再驻定[18,19], 利用惰性气体熄爆封闭空间上侧爆轰波, 使其与壁面相互作用形成的马赫干结构驻定于楔面, 甚至使其转变为规则反射结构驻定于燃烧室等[20,21].

由于爆轰属于典型预混火焰, 斜爆轰发动机稳定运行的关键之一是燃烧室入口气流需满足斜爆轰起爆条件[22–24]. 一方面, 来流总温越高, 可燃气体混合物接近恰当比且混合越均匀, 对斜激波后化学反应的诱发越有利. 但是, 由于斜爆轰发动机运行马赫数较高, 为了增加燃料与空气来流混合长度, 喷注系统一般设置于进气道内[25], 即外喷式构型方案. 斜爆轰发动机燃料喷注系统一般采用阵列式喷注设计以获得展向分布更均匀的气流. 但实际上该阵列式喷注系统可诱导复杂的激波、边界层、膨胀波之间相互作用, 进气道内形成复杂剪切涡结构等, 使斜爆轰发动机燃烧室入口气流呈现明显的三维非均匀特征. 另外, 斜爆轰发动机适用马赫数较高, 高速来流下燃料喷出后易在壁面附近沉积, 使得燃料的穿透深度难以满足斜爆轰发动机燃烧室高度设计要求. 即燃烧室下侧斜爆轰起爆楔面附近燃气当量比较低, 甚至为纯净空气. 这一现象对斜爆轰的起爆特征具有重要影响. 因此, 考察楔面附近低当量比与外侧恰当比燃气组成的分层燃气来流对斜爆轰起爆特征的影响规律是有必要的. 本文重点探讨喷注系统穿透深度不足以匹配燃烧室高度而诱导形成的横向非均匀性气流对斜爆轰起爆特征的影响规律, 忽略喷注系统诱导的三维效应的影响, 旨在为进气道系统与燃烧室系统的高度匹配设计提供科学指导.

2　数值方法与计算模型

本文计算考虑了黏性和无黏两种工况, 针对无黏算例, 计算采用基于基元反应模型的二维Euler方程, 而黏性算例则采用基于基元反应模型的N-S (Navier-Stokes)方程. 由于两种方程组相似, 差异主要体现在有无黏性项, 因此本文仅针对更为复杂的N-S方程进行描述:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{E}_1}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial y}=\frac{\partial \mathbf{E}_2}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial y}+\mathbf{S}, \tag{1}$$

其中, 向量$\mathbf{U}$代表守恒量, 向量$\mathbf{E}_1$和$\mathbf{F}_1$分别表示x和y方向上的无黏流通量, 向量$\mathbf{S}$表示化学反应源项, 它们的具体表达形式如下:

$$\begin{aligned}&\mathbf{U}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho e\\ \rho_i\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_1=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho uu+p\\ \rho uv\\ \rho ue+pu\\ \rho_i u\end{bmatrix},\\ &\mathbf{F}_1=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho vv+p\\ \rho ve+pv\\ \rho_i v\end{bmatrix},\ \mathbf{S}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ \omega_i\end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{2}$$

向量$\mathbf{E}_2$和$\mathbf{F}_2$分别表示x和y方向上的黏性流通量, 其具体表达形式如下:

$$\begin{aligned}&\mathbf{E}_2=\frac{1}{Re}\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ q_x+u\tau_{xx}+v\tau_{xy}\\ \dfrac{1}{Sc}\rho D_i\dfrac{\partial Y_i}{\partial x}\end{bmatrix},\\ &\mathbf{F}_2=\frac{1}{Re}\begin{bmatrix}0\\ \tau_{yx}\\ \tau_{yy}\\ q_y+u\tau_{yx}+v\tau_{yy}\\ \dfrac{1}{Sc}\rho D_i\dfrac{\partial Y_i}{\partial y}\end{bmatrix},\end{aligned} \tag{3}$$

其中变量ρ, e, T和p分别表示气体的密度、比内能, 温度和压强. 变量u, v分别表示气体在x和y方向的流动速度. $\rho_i\ (i=1,2,...,n)$表示第i个组分的气体密度, $\omega_i\ (i=1,2,...,n)$表示第i个组分的生成速率, 由Arrhenius公式计算得到. q_x和q_y分别表示气体沿x和y方向的

能量输运项, 其具体表达式如下:

$$q_x=\frac{\gamma T^*}{(\gamma-1)U^{*2}}\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{1}{Sc}\sum_{i=1}^{n}\rho D_i h_i\frac{\partial Y_i}{\partial x}, \tag{4}$$

$$q_y=\frac{\gamma T^*}{(\gamma-1)U^{*2}}\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{1}{Sc}\sum_{i=1}^{n}\rho D_i h_i\frac{\partial Y_i}{\partial y}. \tag{5}$$

τ_{xx}和τ_{xy}分别表示沿两个方向气体所承受的切应力, 由以下表达式计算(为了方便, 采用张量形式表达):

$$\tau_{ij}=\begin{cases}\mu\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), & i\neq j,\\ \mu\left(2\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}-\dfrac{2}{3}\dfrac{\partial u_k}{\partial k}\right), & i=j,\end{cases} \tag{6}$$

其中γ为气体的比热比, μ为气体的黏性系数, D_i表示第i组分的扩散系数, h_i表示第i组分的焓值, Y_i表示第i组分的质量分数. 变量Pr表示普朗特数, Sc表示施密特数, Re表示雷诺数, 由以下公式计算, 其中带星标号(*)的变量为参考变量:

$$Pr=\frac{C_p\mu}{k},\ Sc=\frac{\mu^*}{\rho^* D^*},\ Re=\frac{\rho^* U^* L^*}{\mu^*}. \tag{7}$$

本文诱导斜爆轰的楔面采用两种结构, 分别为尖楔结构和钝楔结构(楔面前缘钝化), 来流与楔面夹角为23°. 本文重点关注35 km高空、Ma8巡航飞行条件下斜爆轰发动机燃烧室内斜爆轰波的起爆特性研究. 为此, 来流参数基于进气道采用等熵压缩形式将高速来流压缩至Ma6.0构建, 此时气流温度400 K, 压力3.6 kPa. 计算采用Steger-Warming矢通量分裂[26]与色散可控耗散差分格式[27] (Dispersion Controlled Dissipation, DCD), 黏性项计算采用二阶中心差分格式, 时间积分项采用二阶Runge-Kutta格式. 计算域示意图如图1所示, 其中左边界与上边界被设置为入口边界, 右边界为超声速出口边界, 下边界固壁分为两类, 无黏算例设置为滑移固壁边界, 有黏算例则被设置为无滑移固壁边界. 本文化学反应过程的计算采用Burke2012机理, 该机理适用于爆轰物理方面的研究.

3　结果和讨论

3.1　斜爆轰波系基本特征及网格无关性验证

本文首先模拟了无黏条件下尖楔诱导斜爆轰流场结构的基本特征, 其温度流场与密度梯度场如图2所示. 可见斜激波(Oblique Shock Wave, OSW)经三波点(Main Triple-wave Point, MTP)后突然向斜爆轰波(Oblique Detonation Wave, ODW)转变, 即此工况下斜爆轰呈现出明显的突变型起爆特征. 在斜爆轰起爆之前, 斜激波后高温高压气体达到其自燃温度诱发化学反应, 流动与化学反应面相互作用形成系列压缩波(Com-

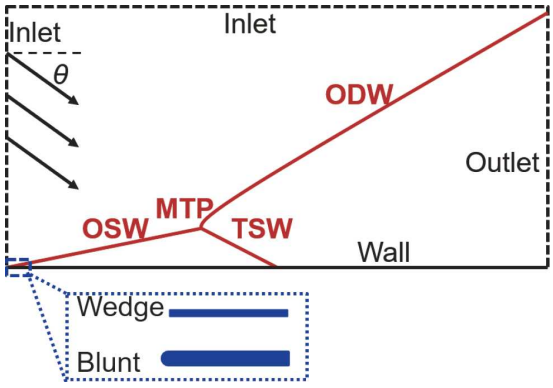


图 1　(网络版彩图)计算模型示意图
Figure 1　(Color online) Schematic diagram of the calculation model.

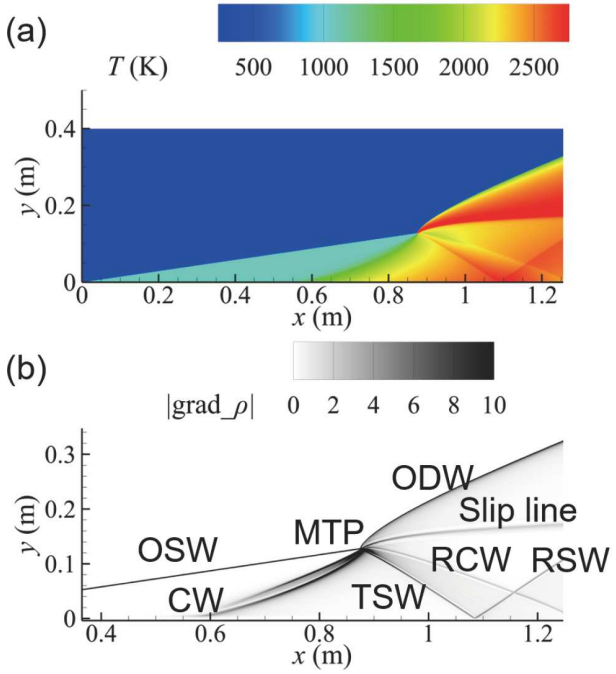


图 2　(网络版彩图)斜爆轰起爆区结构特征. (a) 温度场云图, (b) 局部密度梯度场云图
Figure 2　(Color online) Structural characteristics of the oblique detonation initiation zone. (a) Temperature contours, (b) local density gradient contours.

pression Wave, CW), 甚至形成斜激波. 突变型起爆模式在三波点附近形成横向激波(Transverse Shock Wave, TSW)并与楔面相互作用后形成反射激波(Reflect Shock Wave, RSW). 由于三波点上下区域气体分别经斜爆轰波和斜激波压缩, 上下流场匹配过程将形成滑移线(Slip Line). 另外, 反应面诱导形成的压缩波反射后形成反射压缩波(Reflect Compression Wave, RCW).

图3展示了不同网格分辨率下斜爆轰流场的温度等值线和沿直线$y = \pm 0.2$和$y = \pm 0.25$的压力分布情况. 可见不同网格分辨率下斜爆轰波的起爆距离、点火诱导距离等特征基本一致, 如图3(a)所示. 本文沿直线$y = \pm 0.2$和$y = \pm 0.25$提取斜爆轰流场的压力分布并展示于图3(b), 可见两条直线斜爆轰流场压力峰值、起跳位置等分布特征几乎重合, 证明本文采用的网格分辨率$\Delta x = 5.0 \times 10^{-4}$ m可以满足本文研究需求. 需要明确的是, 本文不同工况算例的起爆距离差异较大, 如果所有算例均采用本文工况最大计算域, 那么计算效率将严重下降, 但对本文讨论的内容与结论不会产生任何影响, 为了平衡计算效率与计算精度, 本文在保证网格精度不变的条件下, 根据算例起爆距离调节计算域的大小.

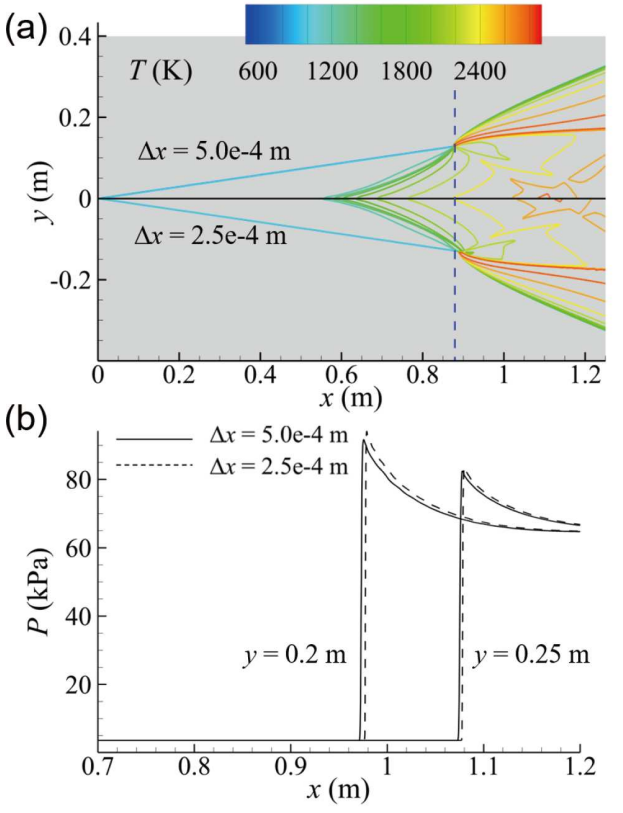


图 3　(网络版彩图)不同网格分辨率下斜爆轰流场特征. (a) 温度等值线, (b) 沿$y = \pm 0.2$和± 0.25 m的压力分布

Figure 3　(Color online) Characteristics of oblique detonation flow fields under different grid resolutions. (a) Temperature contour lines, (b) pressure distributions along $y = \pm 0.2$ and ± 0.25 m.

另外, 由于黏性边界层以及楔面钝化前缘对斜爆轰起爆特征具有明显影响, 本文进一步考虑黏性边界层的影响以及钝化前缘楔面的影响, 开展了分层气体对此三种诱导模式斜爆轰起爆特性的影响规律. 本文计算工况下, 黏性边界层与钝化前缘楔面诱导的斜爆轰流场如图4所示, 其影响主要体现在斜爆轰起爆距离的缩短与斜爆轰起爆区横波的减弱. 本文黏性算例边界层第一层网格高度为5×10^{-5} m, 增长率为1.01, 满足本文需求. 但需要注意的是, 斜爆轰起爆区横波减弱仅针对本文特定工况, 实际还可能存在另一特征工况: 更强的横波可能会在楔面诱导回流区, 且该回流区逐渐增大、前移致使斜爆轰起爆距离大幅缩短, 甚至诱导出现非稳态、脱体斜爆轰.

3.2　分层气体界面位置对斜爆轰起爆特征的影响规律

对于外喷式斜爆轰发动机, 燃料喷注系统与进气

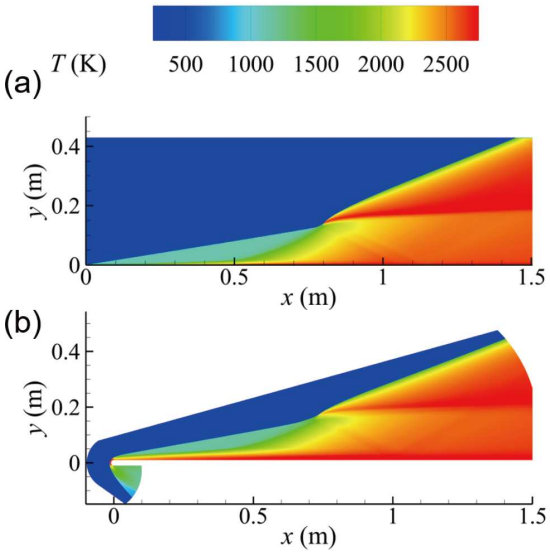


图 4　(网络版彩图)黏性尖楔(a)及钝楔(b)诱导斜爆轰流场结构

Figure 4　(Color online) Oblique detonation flow field structures induced by a viscous wedge (a) and a blunt wedge (b).

道系统耦合, 得益于发动机进气道的流向长度较长, 其有利于燃料与高超声速来流的充分混合, 但穿透深度的不足可能导致可燃混合气体进入燃烧室时呈现出横向非均匀特征. 特别地, 进气道外侧燃料占比较低, 呈现出低当量比特征, 即燃烧室诱导斜爆轰的楔面附近呈现较低当量比工况, 甚至出现无燃料工况. 本节首先考虑喷注穿透深度对斜爆轰起爆特征的影响规律, 其直接体现为分层气体的厚度.

在本文中, 气体分层界面与速度平行, 分层厚度由分层界面与楔面的相互作用点X_0 (流场初始阶段)定义, 其中, 图5展示了气体分层位置X_0 = 0.45 m时斜爆轰流场, 流场分布层位置如白色虚线所示. 其中, 图5(a)展示了斜爆轰反应诱导区上游氢气的分布特征. 本工况将靠近楔面一侧的分层气流设置为空气, 远离侧则设置为恰当比的氢气-空气混合物. 为了进一步明确本工作分层气体的设置细节, 本文沿白色实线提取流场燃料当量比分布, 展示了分层界面两侧当量比突跃变化, 如图5(a)右上侧线图所示. 可见两种气流始终保持明显的分层特性, 经其与楔面相互作用形成斜激波的压缩后二者仍然保持明显的分层. 图5(b)展示了斜爆轰反应诱导区下游流场结构. 可见, 在楔面附近, 由于来流为空气, 因此不存在斜爆轰波后产物, 外侧氢气-空气混合物由于斜激波压缩后温度升高诱导化学反应, 并最终演化为斜爆轰波. 且化学反应起始位置位于斜激波压缩后的分层界面上, 斜爆轰呈现明显的突变型起爆特征, 与基础算例基本一致, 但起爆距离大幅延长. 另外, 沿白色实线提取的流场温度剖面显示空气分层内气体温度约1200 K, 略高于上游斜激波后温度1075 K, 这表明在空气分层内存在某种机制致使该层气体温度升高.

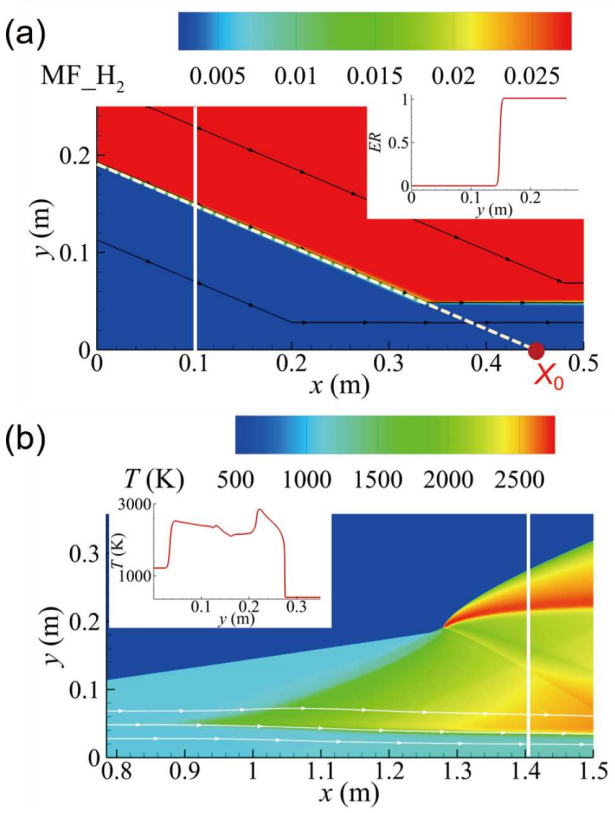


图 5　(网络版彩图)分层来流斜爆轰流场特征. (a) 斜激波区, (b) 斜爆轰区

Figure 5　(Color online) Characteristics of stratified incoming flow oblique detonation flow field. (a) Oblique shock wave region, (b) oblique detonation region.

为了进一步分析分层厚度对斜爆轰起爆特征的影响规律, 本文针对分层面位置X_0 = 0.225, 0.45和0.85 m三组工况进行数值模拟, 并沿4条流线(Stream1–4)提取流场压力分布, 其流场结构数值纹影以及沿流线的压力分布如图6所示. 当X_0 = 0.225 m时, 斜爆轰起爆点相对均匀来流算例向下游移动. 此工况下, 流线Stream1和Stream2分别位于空气层和燃气层内, 在化学反应诱发点上游, 二者压力几乎重合, 诱发点下游二者均呈现出上升趋势, 且沿Stream2的压力上升更加明显, 另外, 在化学反应诱发点下游, 气体分层界面呈现下降趋势, 如图6(a)所示. 当X_0 = 0.45 m时, 斜爆轰起爆点进一步向下游移动, 但斜爆轰起爆结构并未出现明显变化. 此时Stream2与分层界面更加邻近且仍位于可燃混合气体层内, 由图6(b)压力分布图可以看出化学反应诱发点下游分层界面上侧压力明显大于下侧, 因此分层界面呈现出向下偏转趋势. 而在更远的下游, 其两侧压力基本相等, 此时分层界面表现为水平状. 但我们进一步提升空气层的厚度使X_0 = 0.85 m时, 斜激波后分层界面高度随之增加, Stream1和Stream2均位于空气分层内, 且此时斜爆轰起爆点位置高于Stream4. 由压力分布图可以看出, 此时沿Stream3提取的压力峰值明显低于前两工况, 这是因为该流线距离斜爆轰起爆点垂直距离增加, 其未穿过由反应面诱导的强斜激波, 如图6(c)所示. 需要注意的是, 尽管分层位置对斜爆轰起爆位置的影响巨大, 但不同分层位置工况的斜爆轰起爆结构几乎完全一致. 说明, 分层位置的改变仅影响斜爆轰起爆位置, 而不影响斜爆轰起

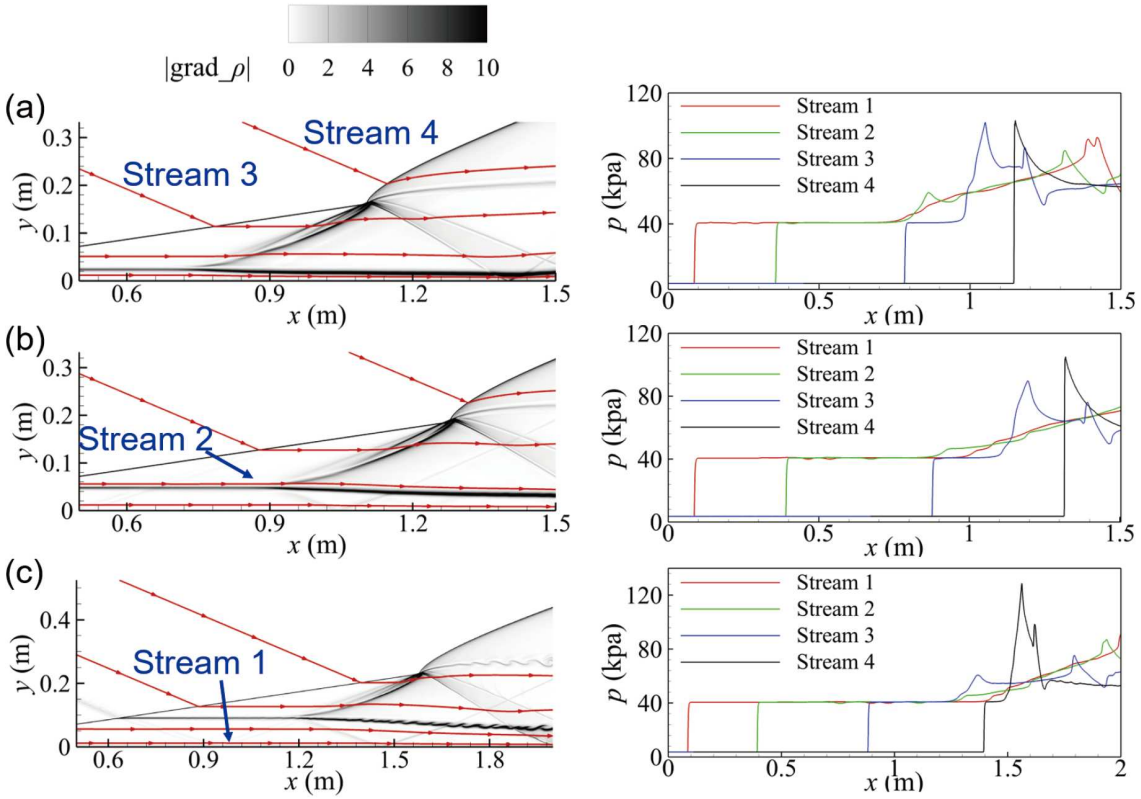


图 6　(网络版彩图)不同分层位置对斜爆轰起爆特征的影响规律. (a) X_0 = 0.225, (b) X_0 = 0.45, (c) X_0= 0.85

Figure 6　(Color online) Influence of different stratification positions on the initiation characteristics of oblique detonation. (a) X_0 = 0.225, (b) X_0 = 0.45, (c) X_0 = 0.85.

爆结构.

为了进一步分析分层位置对斜爆轰起爆特征的影响规律，本文针对不同分层位置下无黏尖楔、有黏尖楔及钝楔诱导斜爆轰流场进行了数值模拟研究，各工况下斜爆轰起爆距离与分层位置关系如图7所示. 其中，起爆距离为楔面起点至起爆点的距离. 突变型起爆的斜爆轰起爆点定义为斜爆轰的起爆三波点，渐变型起爆的斜爆轰起爆点则定义为反应与激波耦合点. 可见, 随着分层厚度的增加, 三种楔面诱导的斜爆轰起爆点均向下游移动. 其中, 均匀来流工况三者起爆距离有较大差异, 随着分层位置的增加, 三者起爆距离差异减小, 最后基本保持同一差距. 可以推断, 对于均匀来流工况, 钝楔前缘诱导更强的曲线激波致使波后温度、压力更高, 更易诱发化学反应, 因此起爆距离更短. 黏性边界层内气流温度更高，且边界层一定程度上增强楔面诱导的斜激波，因此黏性尖楔工况斜爆轰起爆距离小于无黏尖楔. 当存在气体分层，化学反应仅在分层界面上侧诱发，邻近楔面附近气体为空气，钝楔与

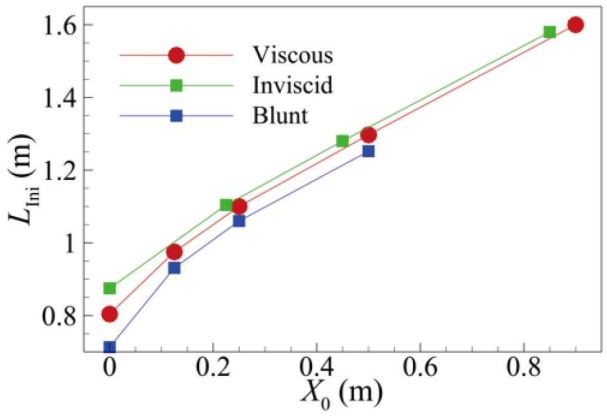


图 7　(网络版彩图)分层位置对斜爆轰起爆距离的影响规律

Figure 7　(Color online) Influence of stratified position on the initiation distance of oblique detonation.

黏性边界层的影响被大幅弱化，此种工况可等效于可燃气作用于气动楔面上，这也就解释了分层界面位置仅影响斜爆轰起爆距离，但对斜爆轰起爆结构几乎无影响的原因.

3.3　分层气体当量比对斜爆轰起爆特征的影响规律

上节本文针对分层气体界面位置对斜爆轰起爆特征的影响进行了分析, 本节则主要开展分层当量比, 即邻近楔面一侧气体的当量比对斜爆轰起爆特征的影响规律分析. 首先, 针对分层界面位置X_0 = 0.50 m工况, 本文模拟了下侧分层气体当量比为0.2, 0.4, 0.6以及0.8时的斜爆轰流场结构的数值纹影图与燃烧产物(H_2O)的等值线分布, 如图8所示. 不同于上节讨论的空气分层结果, 当下侧分层气体为低当量比的可燃气时, 尽管斜爆轰起爆距离受当量比减小的影响而向下游移动, 但此时下侧分层气体受斜激波压缩后温度升高, 仍可诱发化学反应. 且随着当量比的升高, 其反应诱发位置与斜爆轰起爆位置也向上游移动. 尽管斜爆轰起爆结构均维持突变型起爆特征, 但其仍存在一些差异, 主要体现在下侧分层气体当量比为0.2时, 斜爆轰起爆结构与基础算例一致, 呈现出双横波结构. 随着下侧分层气体当量比的增加, 双横波结构呈现合并趋势. 可见, 此时分层气体对斜爆轰起爆结构存在影响, 但其无法改变斜爆轰起爆类型.

为了进一步分析分层气体当量比对斜爆轰起爆结构的影响规律, 本文进一步将分层界面位置向下游移动至X_0 = 1.50 m, 即增加分层气体的厚度, 此时斜爆轰起爆结构发生严重变化. 当分层气体当量比为0.2时, 斜爆轰起爆结构呈现明显突变型起爆特征, 且观察到双横波结构的存在. 不同于基础算例的双横波起爆结构, 本工况斜爆轰起爆区仅存在一条横向激波, 起爆区上游横波结构是反应面诱导的斜激波与分层界面相互作用形成的反射激波, 如图9(a)所示. 当增加分层气体当量比至0.4时, 斜爆轰起爆结构呈现明显的渐变型起爆特征, 且起爆位置向上游移动. 此时观察到的横波结构为反射激波, 即起爆区上游反应面诱导斜激波与前导激波相互作用后反射, 然后透射过反应面形成一道横波, 如图9(b)所示. 进一步增加分层气体当量比为0.6时, 其起爆结构与当量比为0.4时相似, 且斜爆轰起爆位置进一步向上游移动, 此时斜激波向斜爆轰波的过渡曲线激波位于分层界面的上游, 即该工况下斜爆轰的起爆位置与起爆结构完全由分层下侧低当量比燃气性质决定, 如图9(c)所示. 当分层气体当量比增加至0.8时, 斜激波向斜爆轰波过渡部分由曲线激波转变为多波点, 即此时斜爆轰起爆类型为突变型起爆, 且起爆位置进一步前移, 如图9(d)所示.

为了进一步分析分层当量比对斜爆轰起爆特性的影响机制, 本文针对当量比为0.2和0.6两种工况开展数值模拟, 起爆区流场结构如图10所示. 当量比为0.2时, 斜爆轰呈现明显的渐变起爆特征, 其与分层当量比为0.2工况(图9(a))起爆结构明显不同, 但分层界面上游激波面位置与反应面分布则完全一致, 如图10(a)所示. 当增加当量比为0.6时, 斜爆轰起爆结果呈现为与分层工况(图9(c))一致的起爆结构, 且斜爆点、反应面完全重合, 二者波面的偏移出现在分层界面下游, 这表明此

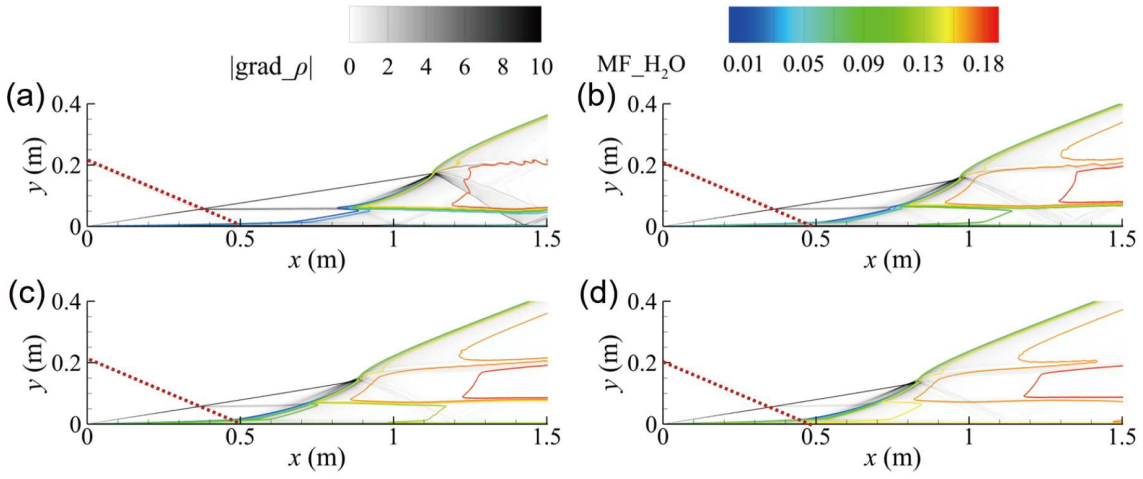


图 8　(网络版彩图)分层当量比对斜爆轰起爆特征的影响(X_0 = 0.5). (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.4, (c) ER = 0.6, (d) ER = 0.8

Figure 8　(Color online) Effect of stratified equivalence ratio on ODW initiation characteristics (X_0 = 0.5). (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.4, (c) ER = 0.6, (d) ER = 0.8.

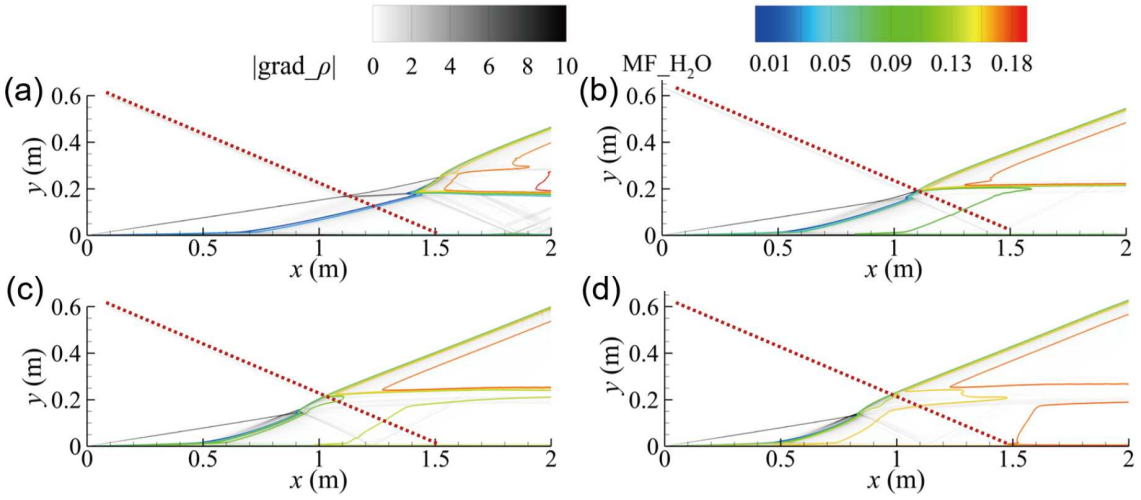


图 9　(网络版彩图)分层当量比对斜爆轰起爆特征的影响(X_0 = 1.5). (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.4, (c) ER = 0.6, (d) ER = 0.8

Figure 9　(Color online) Effect of stratified equivalence ratio on ODW initiation characteristics (X_0 = 1.5). (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.4, (c) ER = 0.6, (d) ER = 0.8.

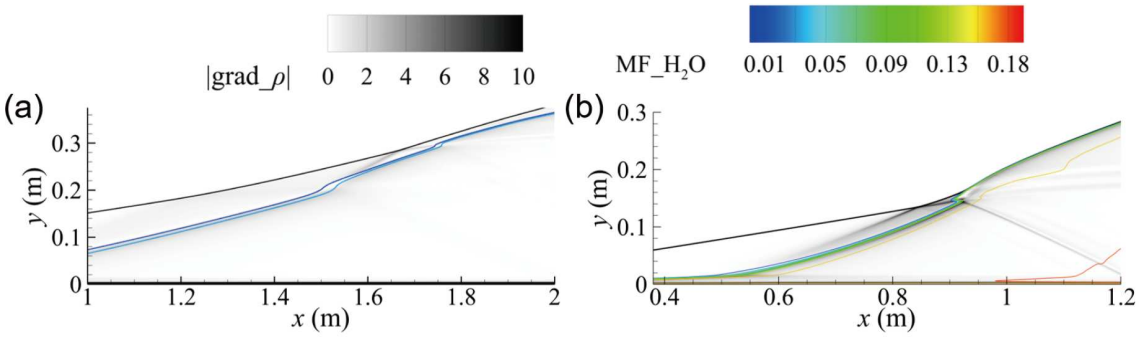


图 10　(网络版彩图)不同当量比来流条件斜爆轰流场起爆区特征. (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.6

Figure 10　(Color online) Oblique detonation field characteristics under different equivalence ratios. (a) ER = 0.2, (b) ER = 0.6.

时斜爆轰起爆区完全由分层反应区控制，如图10(b)所示. 对比分析可明确斜爆轰起爆结构特征主要由其上游反应演化决定.

本文进一步针对无黏尖楔、有黏尖楔和钝楔诱导斜爆轰对分层气体当量比变化的响应特征开展分析. 由图11可见，不同诱导工况斜爆轰的起爆距离均随分层下侧气体当量比的增加而减小. 并且，随着分层当量比的增加，三种诱导方式的起爆距离差异增大. 由本文上节可知，当下侧分层气体为空气时，不同诱导方式产生的斜激波后的可燃气体层热力学状态差异较小, 因此起爆距离差异较小. 当下侧分层气体为可燃气体时, 钝楔诱导的强斜激波更易诱发化学反应, 有黏尖楔次之, 无黏尖楔诱发化学反应距离最远. 因此. 随着下侧分层气体当量比的增加，化学反应诱发条件越容易达成，钝楔诱发化学反应的优势更加突出，斜爆轰起爆也更容易. 因此导致三种诱导形式的斜爆轰起爆距离逐渐缩短, 但差异增大.

4　结论

本文采用基于基元反应的二维N-S方程以及Euler方程开展了不同诱导方式下斜爆轰起爆特征对分层气体来流的响应规律研究. 该研究基于外喷式斜爆轰发动机喷注诱导的非均匀特征进行简化，探讨喷注系统穿透深度不足以匹配燃烧室高度而诱导形成的横向非均匀性气流对斜爆轰起爆特征的影响规律. 本文通过

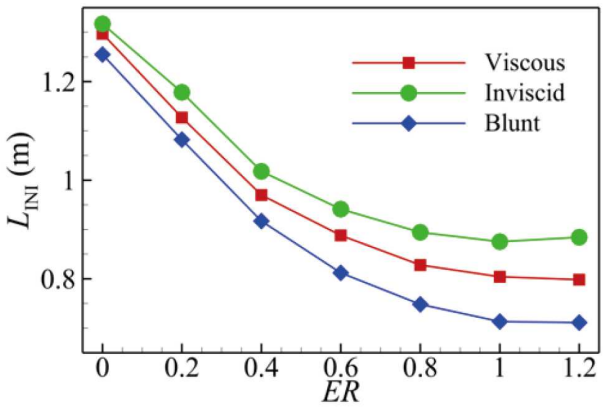


图 11　(网络版彩图)分层当量比对斜爆轰起爆距离的影响规律

Figure 11　(Color online) Influence of stratified equivalence ratio on oblique detonation initiation distance.

调整分层气体界面与楔面相交点位置以及靠近楔面一侧分层气体的当量比模拟进气道喷注过程诱导的燃烧室入口气流的非均匀性特征，旨在为斜爆轰发动机进气道系统与燃烧室系统的耦合设计提供参考. 喷注穿透深度不足导致发动机燃烧室诱导斜爆轰的楔面附近气流呈现低当量比特性, 甚至呈现完全的空气分层, 而穿透深度直接影响该分层的厚度. 本文采用分层界面与楔面相交点位置X_0评价分层气体的厚度. 研究发现, 空气分层的厚度对斜爆轰的起爆结构几乎无影响, 但会严重影响斜爆轰起爆距离. 当分层厚度较大时, 斜爆轰起爆距离与分层位置呈正比例演化. 当近壁面分层气体为低当量比可燃气时, 斜爆轰的起爆距离与起爆结构均可能受其影响而改变. 特别地, 当降低分层气体当量比时, 斜爆轰起爆点位置向下游移动, 且其起爆结构可能由突变型转变为渐变型结构, 这主要是因为斜爆轰起爆结构受上游燃烧发展演化过程影响, 当量比改变直接影响起爆区上游反应面的发展, 进一步改变斜爆轰的起爆结构.

参考文献

1 Zhang B, Bai C H. Research progress on the dynamic characteristics of gaseous detonation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 665–681 [张博, 白春华. 气相爆轰动力学特征研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 665–681]

2 Jiang Z L, Teng H H. Research on some fundamental problems of the universal framework for regular gaseous detonation initiation and propagation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 421–435 [姜宗林, 滕宏辉. 气相规则胞格爆轰波起爆与传播统一框架的几个关键基础问题研究. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学 2012, 42: 421–435]

3 Jiang Z, Hu Z, Wang Y, et al. Advances in critical technologies for hypersonic and high-enthalpy wind tunnel. Chin J Aeronaut, 2020, 33: 3027–3038

4 Yao K, Yang P, Teng H, et al. Effects of injection parameters on propagation patterns of hydrogen-fueled rotating detonation waves. Int J Hydrogen Energy, 2022, 47: 38811–38822

5 Teng H, Zhou L, Yang P, et al. Numerical investigation of wavelet features in rotating detonations with a two-step induction-reaction model. Int J Hydrogen Energy, 2020, 45: 4991–5001

6 Jiang Z, Zhang Z, Liu Y, et al. Criteria for hypersonic airbreathing propulsion and its experimental verification. Chin J Aeronaut, 2021, 34: 94–104

7 Jiang Z. Standing oblique detonation for hypersonic propulsion: A review. Prog Aerosp Sci, 2023, 143: 100955

8 Wolański P. Detonative propulsion. Proc Combust Inst, 2013, 34: 125–158

9 Kailasanath K. Review of propulsion applications of detonation waves. AIAA J, 2000, 38: 1698–1708

10 Teng H H, Yang P F, Zhang Y N, et al. Flow and combustion mechanism of oblique detonation engines (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 090008 [滕宏辉, 杨鹏飞, 张义宁, 等. 斜爆震发动机的流动与燃烧机理. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 090008]

11 Zhang Z, Liu Y, Wen C. Mechanisms of the destabilized Mach reflection of inviscid oblique detonation waves before an expansion corner. J Fluid Mech, 2022, 940: A29

12 Yang P F, Zhang Z J, Yang R X, et al. Theoretical study on propulsive performance of oblique detonation engine (in Chinese). Chin J Theor Appl Mech, 2021, 53: 2853–2864 [杨鹏飞, 张子健, 杨瑞鑫, 等. 斜爆轰发动机的推力性能理论分析. 力学学报, 2021, 53: 2853–2864]

13 Ling W, Ren C, Zhou L, et al. Numerical study on the internal/external flow and thrust-drag characteristics of oblique detonation engine-based

aircraft. Aerosp Sci Tech, 2024, 152: 109322
14 Han X, Zhang W S, Zhang Z J, et al. Experimental study on RP3 aviation kerosene oblique detonation engine (in Chinese). J Exp Fluid Mech, 2024, 38: 1–9 [韩信, 张文硕, 张子健, 等. RP3航空煤油斜爆轰发动机试验研究. 实验流体力学, 2024, 38: 1–9]
15 Sun J, Yang P, Chen Z. Dynamic interaction patterns of oblique detonation waves with boundary layers in hypersonic reactive flows. Combust Flame, 2025, 271: 113832
16 Teng H H, Jiang Z L. On the transition pattern of the oblique detonation structure. J Fluid Mech, 2012, 713: 659–669
17 Yang P, Teng H, Jiang Z, et al. Effects of inflow Mach number on oblique detonation initiation with a two-step induction-reaction kinetic model. Combust Flame, 2018, 193: 246–256
18 Yao K, Yang P, Li H, et al. Characteristics of reattached oblique detonation induced by a double wedge. Phys Fluids, 2023, 35: 036112
19 Yao K, Wang C, Jiang Z. A numerical study of oblique detonation re-stabilization by expansion waves. Aerosp Sci Tech, 2022, 122: 107409
20 Yao K, Han G, Wang C, et al. Effect of stratified fluid on the stationary of oblique detonation in confined space. Aerosp Sci Tech, 2025, 165: 110477
21 Liu Y, Xiao B G, Wang L, et al. Standing stability enhancement method of oblique detonation waves in a confined space and its experimental validation (in Chinese). J Exp Fluid Mech, 2021, 35: 109–116 [刘彧, 肖保国, 王兰, 等. 封闭空间中斜爆震驻定稳定性增强方法及其试验验证. 实验流体力学, 2021, 35: 109–116]
22 Fang Y, Hu Z, Teng H. Numerical investigation of oblique detonations induced by a finite wedge in a stoichiometric hydrogen-air mixture. Fuel, 2018, 234: 502–507
23 Fang Y, Zhang Y, Deng X, et al. Structure of wedge-induced oblique detonation in acetylene-oxygen-argon mixtures. Phys Fluids, 2019, 31: 026108
24 Xiang G, Li X, Sun X, et al. Investigations on oblique detonations induced by a finite wedge in high altitude. Aerosp Sci Tech, 2019, 95: 105451
25 Sun Y, Zhu R, Guo H, et al. Effects of equivalence ratios on the oblique detonation initiation in ammonia/hydrogen/air mixtures. Combust Flame, 2025, 278: 114279
26 Steger J L, Warming R F. Flux vector splitting of the inviscid gasdynamic equations with application to finite-difference methods. J Comput Phys, 1981, 40: 263–293
27 Jiang Z L. On dispersion-controlled principles for non-oscillatory shock-capturing schemes. Acta Mech Sin, 2004, 20: 1–15

Effect of hypersonic stratification gas inflow on the initiation characteristics of oblique detonation

YAO Kepeng[1], LIAO Wenbin[1,2] & HAN Guilai[1,2*]

[1] *State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
[2] *School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
**Corresponding author (email: hanguilai@imech.ac.cn)*

Oblique detonation is a typical premixed combustion mode. Characteristics such as the equivalence ratio and uniformity of combustible gases ahead of the detonation wave exert a significant influence on the initiation characteristics of the oblique detonation wave. The external-injection oblique detonation engine couples the fuel injection system with the inlet system to increase the mixing and evolution length of fuel with the high-speed air flow, but it may result in the fuel penetration depth failing to cover the height of the combustion chamber of the oblique detonation engine (ODE). In this study, the two-dimensional Navier-Stokes equation coupled with the Euler equation based on a detailed chemical reaction model is employed to investigate the effect of the airflow stratification induced by inadequate fuel coverage of the oblique detonation combustion chamber on the oblique detonation initiation characteristics. The results indicate that when the airflow adjacent to the wedge surface is air, the detonation initiation length increases with the increase in stratification thickness, while the initiation structure remains nearly unaffected. In contrast, when the stratified layer consists of low-equivalence-ratio combustible gas, the initiation distance also gradually increases with the decrease in equivalence ratio. Notably, this scenario may induce a transition in the oblique detonation initiation structure from an abrupt type to a gradual type. This phenomenon is primarily attributed to the strong dependence of the oblique detonation initiation structure on the evolution of the upstream chemical reaction zone; variations in the stratified equivalence ratio directly regulate the structural characteristics of the chemical reaction zone downstream of the oblique shock wave. This study focuses on analyzing the influence mechanism of stratified gas characteristics on the oblique detonation initiation characteristic, aiming to provide insights for the matching design of the combustion chamber and inlet system in ODEs.

oblique detonation, stratified gas, initiation characteristic, equivalence ratio, ODE

PACS: 47.40.Ki, 47.55.HD, 47.40.Rs

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0635