

# 障碍物角度对氢 - 空气混合物爆燃转爆轰影响的数值研究

李 毅, 廖慧倩, 黎南芳

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月27日

## 摘 要

为了研究在封闭通道内增强爆轰的最佳障碍物角度, 本研究采用在OpenFOAM平台上实现的大涡模拟 (LES) 方法, 对障碍物角度(30°、60°、90°、120°、150°)对火焰加速和爆轰起爆的影响进行了详细的数值研究。结果表明, 在燃烧室中间设置障碍物可以形成更多的局部火焰。同时, 障碍物角度的变化也会产生不同的涡结构和回流区。这些差异会影响燃烧反应速度, 从而影响火焰加速效果。从结果来看, 障碍物角度越大, 火焰加速效果越好。在爆轰起爆过程中, 倾斜障碍物确实可以更早地诱导涡流过早分离, 同时增强旋涡结构与火焰前缘的耦合, 但一旦障碍物角度超过临界值, 越来越开放的几何形状抑制了障碍物附近有效热点的形成, 由此产生的压力波更容易向下游排出, 而不是局部能量沉积。它不能在障碍物附近进行主动反射和聚焦, 因此需要较远的距离才能加速并实现爆轰。本研究可为障碍物对可燃气体爆轰影响的研究进行了补充, 为实际防爆设计提供参考。

## 关键词

火焰加速, 不同角度障碍物, 爆轰, 大涡模拟, OpenFOAM

## Numerical Study of the Effect of Solid Obstacles at Different Angles on Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition

Yi Li, Huiqian Liao, Nanfang Li

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 20, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 27, 2025

文章引用: 李毅, 廖慧倩, 黎南芳. 障碍物角度对氢-空气混合物爆燃转爆轰影响的数值研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1528-1541. DOI: 10.12677/me.2025.136168

## Abstract

To investigate the optimal obstacle angel for enhancing detonation within a closed channel, this study employs the Large Eddy Simulation (LES) method, implemented on the OpenFOAM platform, to perform a detailed numerical investigation of the influence of obstacle angle (30°, 60°, 90°, 120°, 150°) on flame acceleration and detonation onset. The results show that setting obstacles in the middle of the combustion chamber can form more local flames. Meanwhile, the change in the angle of the obstacle will also generate different vortex structures and reflux zones. These differences will affect the combustion reaction rate, thereby influencing the flame acceleration effect. Judging from the results, the larger the Angle of the obstacle, the better the flame acceleration effect. During detonation initiation, inclined obstacles can indeed induce premature vortex detach earlier and simultaneously enhance the coupling between vortical structures and the flame front, but once the obstacle angle exceeds a critical value, the increasingly open geometry suppresses the formation of effective hotspots in the vicinity of the obstacle, and the resulting pressure wave is more prone to vent downstream rather than contribute to localized energy deposition, therefore, it can not actively reflect and focus near obstacles, so requires a longer distance to accelerate and achieve detonation. This study can supplement the research on the influence of obstacles on the detonation of flammable gases and provide a reference for actual explosion-proof design.

## Keywords

Flame Acceleration, Different Angle Obstacles, Detonation, LES, OpenFOAM

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

由于传统化石燃料造成的环境污染和全球变暖,人们对替代燃料的兴趣越来越大[1]。氢能是一种用途广泛、绿色、低碳、储量丰富的二次能源,正成为全球能源转型发展的重要组成部分。然而,氢气也有其挑战性,如泄漏、易燃性和爆炸性,在其制备、储存、运输和使用过程中会威胁设备安全和人民生命财产[2]-[4]。研究人员已经证明,氢-氧[5]和氢-空气[6][7]混合物的弱点火导致火焰快速加速和通过爆燃转爆轰(DDT)机制在受限和开放空间中的爆轰燃烧。在从爆炸安全的设计或分析工业设施时,应考虑到这种最坏情况,而在实际过程中,通道中的固体障碍物会在火焰传播过程中产生强烈的干扰,影响其加速,甚至引发爆炸[8]。因此,研究障碍物对火焰加速和燃烧转爆轰的影响具有重要的科学意义和实用价值。

已有研究表明,空间内障碍物容易引发爆炸反应过程,导致火焰传播速度加快,超压增大。前人研究主要集中于障碍物布置、阻塞率以及形状等对火焰加速以及爆震的影响。Wang [9]的研究表明,单侧阻塞率过高会不利于 DDT 的发生,可能源于其对流场的过度抑制或淬熄效应。Sacid 等人[10]的数值研究进一步证实,减小障碍物间距能有效缩短均质和非均质氢气-空气预混气体的 DDT 时间和距离。此外,障碍物布置模式与燃料浓度场的相互作用至关重要:Sheng 和 Wang 等人[9][11]评估了障碍物放置对均匀与非均匀浓度场中 DDT 的影响,发现在均匀浓度场中,对称布置的障碍物最有利于缩短 DDT 距离和时间;而在非均匀浓度场中,非对称布置可能更具优势。Ibrahim 等人[12]通过变化障碍物阻塞比(10%~75%)

的实验发现,随着障碍物宽度增加,管道内最大超压显著增长,且达到最大超压所需时间逐渐缩短,表明高阻塞比在特定条件下能强化能量释放速率。NA'INNA 等人[7]进一步指出,障碍物通过增强反应速率促进 FA/DDT,并存在一个临界阻塞比使流场扰动对火焰的影响最大化,此时湍流强度和爆炸强度达到峰值。Porowski [13]的实验揭示了间距影响的非线性特征,表明火焰压力会随障碍物间距的增加先增大后减小,即存在一个最优间距范围使压力增长最大化。Maeda 等人[14]在方管内的研究同样支持高阻塞比的积极作用,证明较大阻塞比有利于火焰加速。然而,阻塞比的影响具有非线性特征:Martin 等人[15]在窄通道实验中发现,火焰速度在阻塞比为 0.1、0.5、0.9 时呈现先升高后降低的趋势,且阻塞比相较于气体浓度等因素对火焰发展的影响更显著。这一现象部分解释了 Teodorczyk 的相反结论,其研究表明过高的阻塞比反而会阻碍火焰传播,暗示存在一个优化区间,超过临界值可能导致流场过度抑制或淬熄。此外,Cassutti 等人[16]关注多障碍物场景,发现在连续障碍物中,第二个障碍物的阻塞率是影响早期爆轰发生的主导因素,而开口形状和尺寸的影响相对较小。

另外形状尖锐度也被证实是增强湍流的核心因素。Masri 等[17]发现方形障碍物诱导的火焰加速度最大(优于三角形与圆形),因尖锐边缘更易触发流动分离;Zhou 与 Xiao 等[18] [19]进一步证明尖锐障碍物(如楔形、锯齿)通过强化 Kelvin-Helmholtz 与 Rayleigh-Taylor 不稳定性,显著提升爆炸超压与火焰传播速度,尖角结构较圆角超压高 25%。空间布局同样具有临界效应。Zhou [18]还指出障碍物间距 $\approx 1$  倍管径时爆炸最剧烈,其压力峰值达其他间距的 2 倍,而 Oh 等[20]发现间距偏离此阈值会导致涡旋能量耗散或火焰淬熄,甚至降低传播速度。特殊构型还可解锁新机制,Bychkov [21]与 Valiev 等[22]在牙刷状障碍物阵列中发现气袋射流效应,障碍物间未燃气延迟燃烧形成高速射流,实现无激波的超快层流加速。Wang [23]通过数值研究进一步量化了形状的影响,三角形障碍物尖端涡旋高效生成,加速效果最优,其次分别是菱形、梯形、矩形、圆形。

总体而言,实验和数值研究已经让我们了解了在障碍物的作用下 FA 和 DDT 的一些现象与变化,然而诸多研究结果仍存在片面性。例如,大量关于障碍物形状的研究表明,形状变化会显著影响火焰加速效果及 DDT 过程,且形状改变往往伴随着障碍物在通道中倾斜角度的变化。因此,亟需深入研究障碍物倾斜角度对 FA 和 DDT 的影响机制。综上所述,为了填补相关研究,本文在前人研究的基础上,采用大涡模拟(LES)方法研究了不同障碍物角度(30°、60°、90°、120°、150°)对火焰加速和 DDT 过程的影响进行了全面而详细的数值研究。该研究填补了障碍物角度对氢气爆炸影响的认识空白,为可燃气体燃料的安全和场地设计优化提供了定量依据,具有重要意义。

## 2. 物理模型及数值模拟方法

### 2.1. 物理模型

图 1 为计算域示意图,计算区域的尺寸为  $L_x$  (长)  $\times$   $L_y$  (高) = 1000 mm  $\times$  20 mm,障碍物厚度为 5 mm,通道周围为绝热固体壁。在初始时刻,通道中充满均匀分布得氢气/空气预混气体,其中氢气的体积分数为 30%。预混气体的温度为 293 K,初始压力为一个大气压,左壁布置半径为 4 mm 的半圆形点火源,点火温度为 2450 K,形成初始火焰。并且为了保证其他因素不影响火焰演化过程,障碍物的阻塞率统一设定为 0.5,第一个障碍物的位置距离点火源 100 mm,障碍物之间的间距为 100 mm。

### 2.2. 数值模拟方法

本研究采用开源软件 OpenFOAM 作为数值模拟工具来求解非定常可压缩的 NavierStokes 方程。所采用的化学反应机理是 O'Conaire 等人提出的 9 个组分、21 个步骤的详细氢/空气反应机理[24]。数值模拟方法选择了大涡模拟,采用有限体积法(FVM)对质量、动量、能量和组分输运方程进行了离散。保证了对

流场参数进行合理、准确的计算。方程表示如下：

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( u_i \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right) + \bar{\rho} g_i \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{K}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{K}) &= \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\tilde{u}}{Pr} + \frac{\tilde{u}_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) + \sum_{k=1}^{N_s} (\tilde{w}_k \cdot h_k) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Sc_{k,t}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \right) + \tilde{w}_k\end{aligned}$$

式中上标短横代表空间体积过滤；上标波浪线表示亚格子尺度不封闭项；字母  $\bar{\rho}$ 、 $\tilde{u}_j$ 、 $P$ 、 $u$ 、 $u_t$ 、 $\delta_{ij}$ 、 $h$ 、 $\tilde{w}_k$ 、 $Y_k$ 、 $D_k$ 、分别表示通道内气体混合物的密度、速度矢量、压力、流体粘度、湍流粘度、克罗内克函数、绝对焓、物质反应速率、质量分数、质量扩散率。

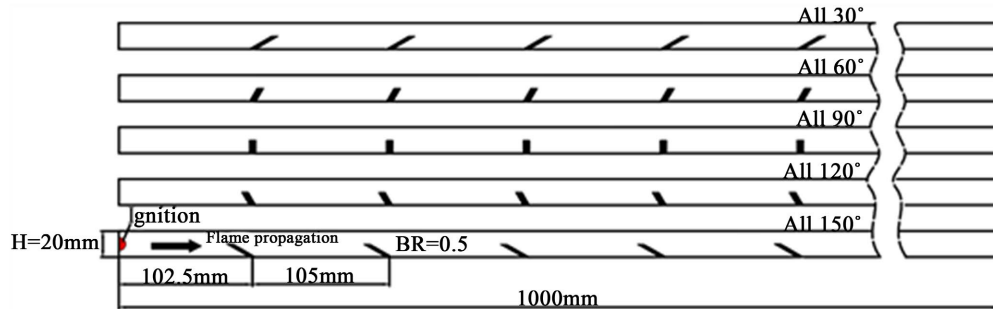


Figure 1. Schematic diagram of the physical model  
图 1. 物理模型示意图

为了保证壁面计算结果的准确性和可靠性，采用 Nicoud 和 Ducros 提出的自适应壁面局部涡流黏度 (WALE)模型对亚网格尺度(SGS)应力进行了评估。它非常适合具有复杂几何特征的结构和从层流到湍流状态过渡的流体运动。在此框架下，计算亚网格尺度涡旋粘度的步骤如下：

$$\mu_t = \bar{\rho} L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}}$$

式中  $S_{ij}^d$  为速度梯度张量， $S_{ij}$  为应变速率张量， $L_s$  为大涡长度尺度。

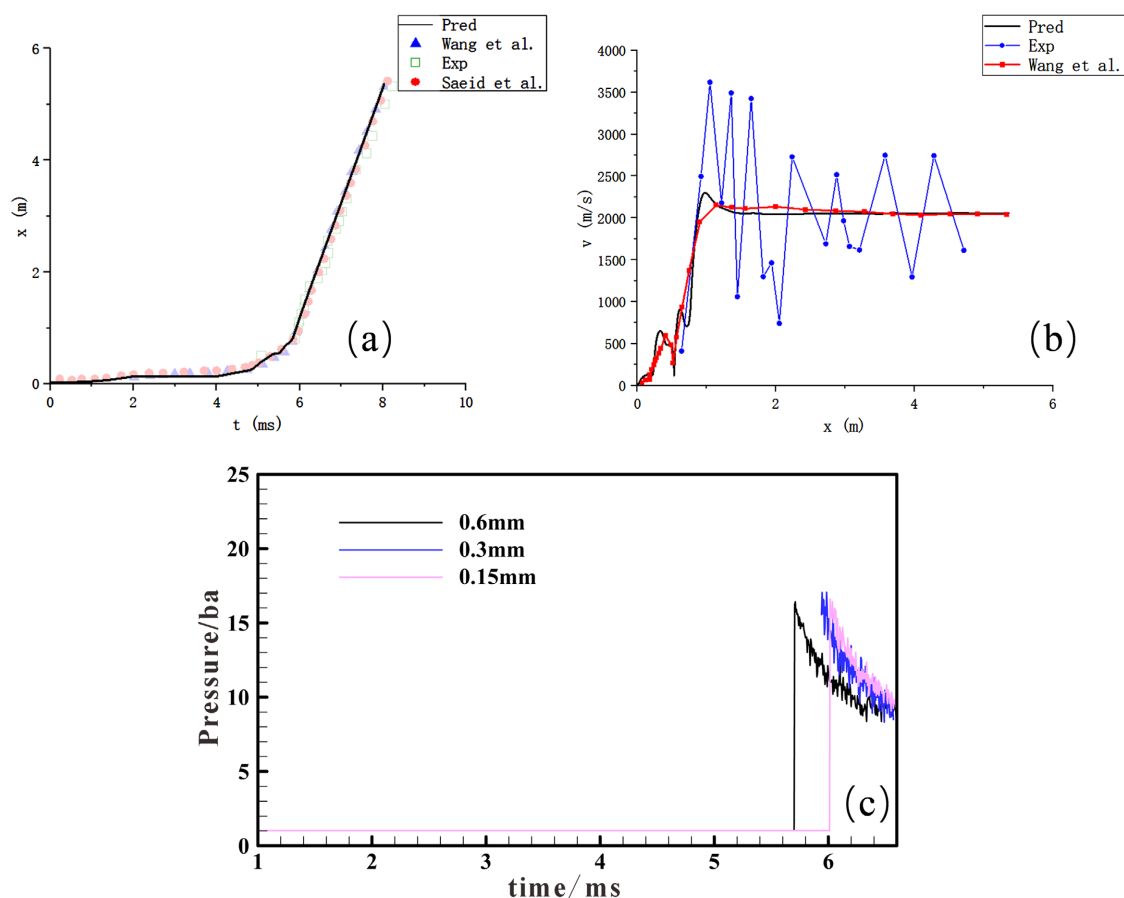
本文采用燃烧与湍流耦合的部分搅拌反应器(PaSR)模型[25]。该模型设想每个网格单元由两个不同的区域组成：化学反应占主导地位的精细结构，以及由湍流混合控制的周围区域。因此，非线性反应速率是通过根据示例体系的体积分数对层流有限速率化学加权来计算的。

时间推进采用二阶显式 Runge-Kutta 方法[26]，粘性项采用二阶中心差分格式。在爆轰起爆过程中，火焰不断加速。因此对于低马赫数，本研究采用 Harten-Lax-van Leer-contact pressure (HLLC-P)黎曼求解器的近似解来计算保守双曲通量。该求解器不仅消除了 HLLC 方案在低马赫数区域的畸变和不稳定问题，而且适用于从高超声速可压缩流到低亚音速不可压缩流的大马赫数范围，进一步提高了[27]方案的稳定性和效率。总反应速率采用隐式四阶 Rosenbrock 刚性常微分方程(ODE)求解器进行积分，扩散通量采用二阶中心差分法进行离散化。对于其他输运方程的求解，采用预条件双共轭梯度稳定(PBiCGStab)算法。

## 2.3. 网格无关性验证

为了进一步验证数值方法的可靠性, 本节引用了慕尼黑工业大学的开放数据库[26]。选择堵塞比为 0.6、障碍物间距( $S$ )为 300 mm、氢气浓度为 30%的数据进行比较。所有数值验证案例都保持与这些参数相同的条件。不可否认, 随着大涡模拟网格分辨率的提高, 截断误差和亚网格应力模拟误差减小。

因此, 本研究使用以下三种网格大小来验证网格独立性: 0.6 mm、0.3 mm 和 0.15 mm。图 2 给出了这项研究的数值验证, 其中实验参考了 Ettner 等人的数据[28]。从定量分析的角度来看, 随着网格尺寸的减小, 数值模拟结果与实验数据之间的一致性有所提高(见图 2(c))。然而, 从 0.3 mm 网格获得的结果与从 0.15 mm 网格获得的结果非常接近, 差异低于 5%。因此, 考虑到计算资源, 本研究最终采用 0.15 mm 网格。进一步从定性的角度, 图 2(a)和图 2(b)给出了从 0.15 mm 网格获得的数值模拟结果与实验结果之间的比较。不难看出, 数值模拟得到的结果与实验非常接近, 这进一步证明了本文所采用的网格选择和数值方法的合理性和准确性。



**Figure 2.** Numerical verification: (a) Flame front position changes with time; (b) Flame velocity; (c) Comparison of pressure curves at  $x = 4.1$  m

**图 2.** 数值验证: (a) 火焰前沿位置随时间变化; (b) 火焰速度; (c)  $x = 4.1$  m 处压力曲线的比较

## 3. 结果与分析

### 3.1. 不同角度障碍物对火焰加速的影响

图 3 展示了工况 1 至工况 5 的火焰演化序列图。在  $t = 0 \sim 1.4$  ms 期间, 初始点火区在燃烧产物膨胀驱

动下逐步扩展，而火焰传播仍以层流为主导。当  $t = 1.4 \text{ ms}$  时，达里厄-朗道不稳定性显现，火焰前端形成明显皱褶。在  $t = 2.6 \sim 2.9 \text{ ms}$  阶段，火焰与不同倾角的障碍物 1 (OB1) 相互作用时呈现出差异化加速效应。这种现象源于不同障碍物角度会产生不同的卷吸效应。从图 1 局部放大图可见，虽然所有构型中障碍物周围都会形成涡旋结构和回流区，但其尺寸与空间分布随角度变化显著：在  $30^\circ$  与  $60^\circ$  工况下，涡旋主要分布于障碍物右侧且影响范围较小；以  $90^\circ$  构型为例，当气流绕经障碍物时会产生更大尺度的涡旋，这些涡旋会卷吸周围未燃混合气并将其带入火焰区，从而增大火焰与新鲜混合气的接触面积，促使燃烧反应更充分并加速火焰传播。随着障碍物角度增大，火焰不稳定性逐渐增强。更复杂的涡结构及增强的火焰回流现象进一步促进了火焰与未燃混合气的掺混，对火焰加速产生更显著影响。这可能会改变对火焰表面的拉伸效应，从而影响整体火焰发展，这也是火焰经过 OB1 后呈现不同加速行为的主要原因之一。关于不同角度障碍物对涡量和回流区的具体影响，将在图 4 中详细讨论。

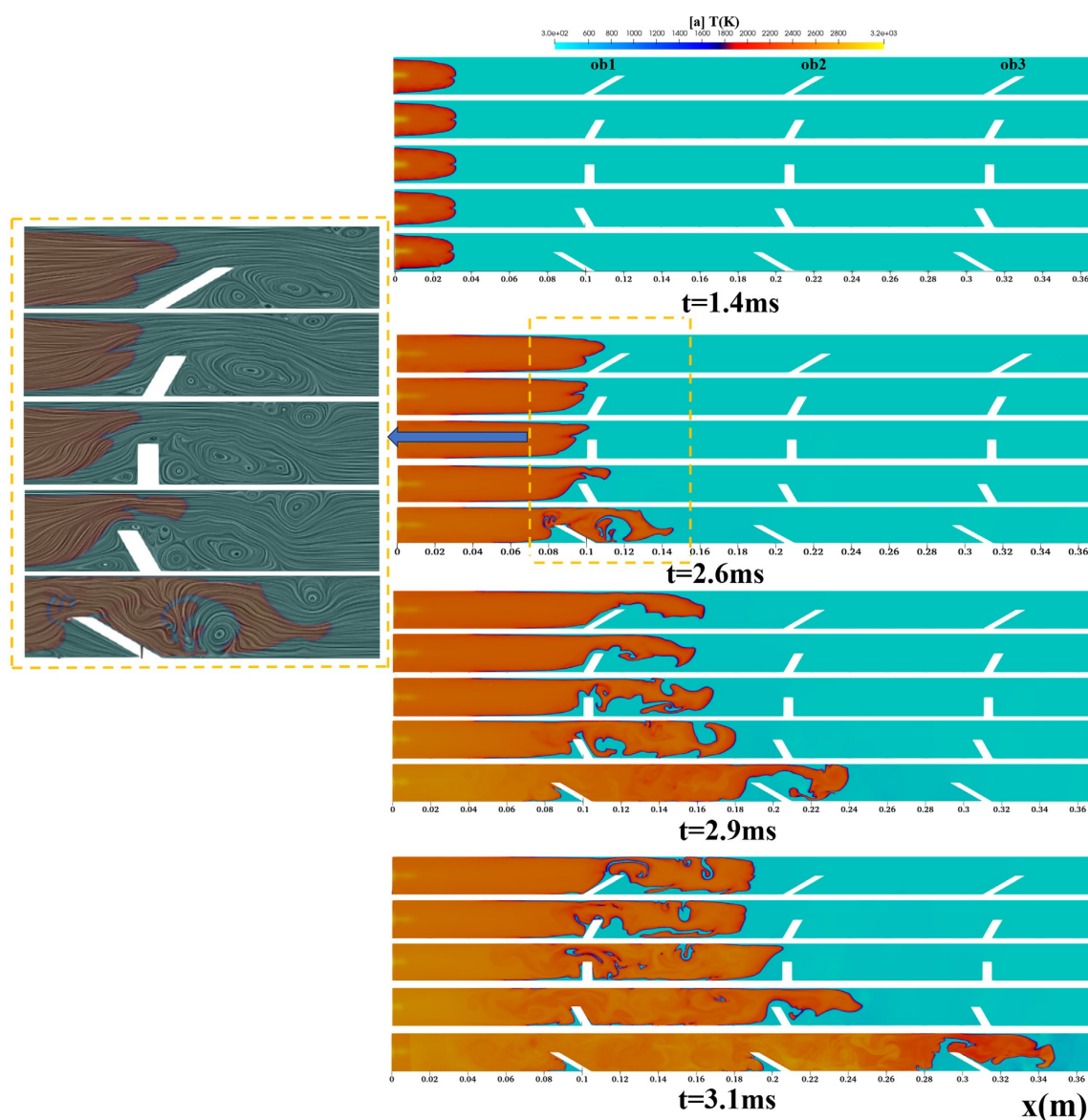


Figure 3. Flame development sequence diagram for operating conditions 1~5

图 3. 工况 1~5 的火焰发展序列图

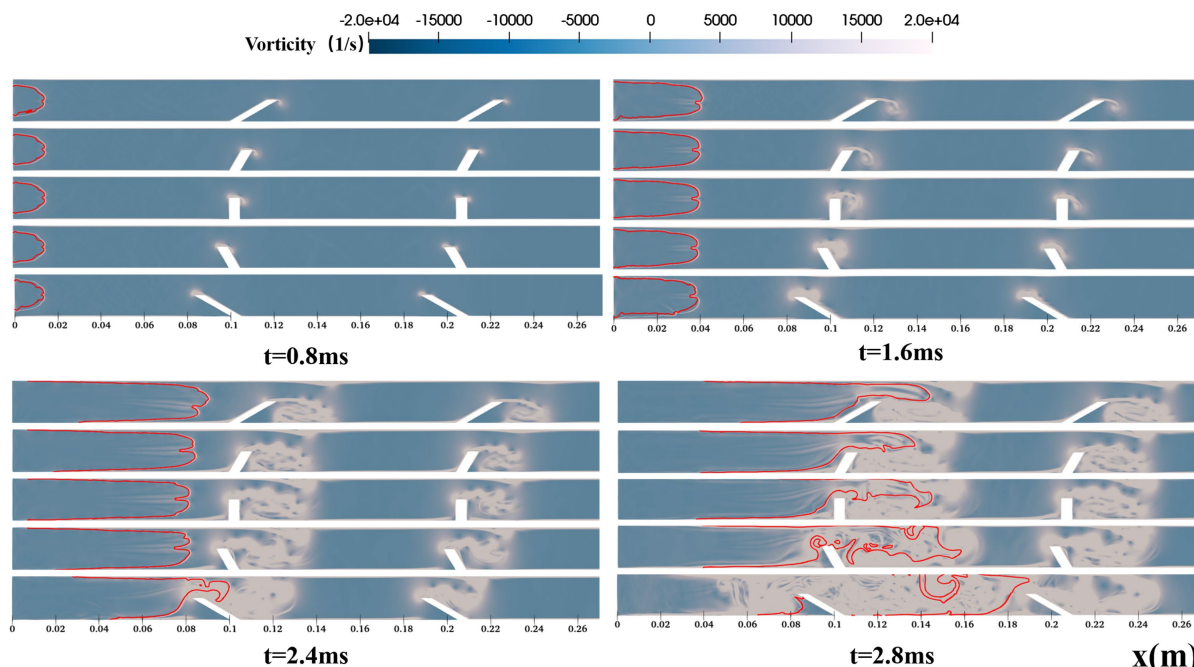


Figure 4. Comparison of vorticity distribution under operating conditions 1~5

图 4. 工况 1~5 的涡度分布比较

为了详细阐述不同障碍物形状对涡结构和回流区形成的影响, 图 3 展示了案例 1 至案例 5 的涡量分布对比, 其中红色实线代表标示火焰形态的 2000 K 等温线。在  $t = 0.8 \sim 1.6$  ms 期间, 火焰尚未穿越障碍物时, 所有案例中 OB1 后方均形成了相对明显的涡结构, 但这些结构的形态随障碍物角度而变化。总体而言, 在火焰发展初期, 涡量变化相对平缓。30°与 60°障碍物易形成细长状涡结构, 而较大角度的障碍物则促使障碍物附近形成紧凑的团簇状涡旋模式。至  $t = 2.4$  ms 时, 所有案例的障碍物后方均形成回流区, 但随着障碍物角度增大, 涡结构日趋复杂。此外, 障碍物右上方逐渐形成新的涡区, 导致流场扰动增强, 相应强化了火焰加速效应。最终在  $t = 2.8$  ms 时, 所有火焰均已通过 OB1。此时前文所述的障碍物角度差异对火焰加速的影响得以显现: 案例 1 中障碍物左上侧逐渐形成涡结构, 而已存在此类涡结构的案例中, 该涡结构会进一步扰动流场。综上所述, 随着角度增大, 障碍物对火焰的阻塞效应愈加显著。当气流绕经障碍物时, 会形成更大范围的高涡量区与回流区。这些涡旋卷吸周围未燃氢气-空气混合气, 增大火焰与新鲜混合气的接触面积, 从而提升燃烧效率并加剧流场扰动, 使火焰能更快速脱离障碍物。这构成了不同角度障碍物影响火焰动力学行为的具体作用机制。

为定量研究不同角度障碍物引发的火焰加速差异, 图 5 展示了 OH 浓度(A)与温度(B)的变化规律。首先从图 5(a)可以清晰观察到, 当火焰受到 OB1 影响时, 障碍物角度对提高 OH 自由基浓度具有显著作用。随后如图 5(b)所示, 火焰温度的变化趋势与 OH 自由基浓度呈现出较高的一致性。

### 3.2. 不同角度障碍物对爆燃转爆轰的影响

为探究不同形状障碍物对爆燃转爆轰过程的影响, 本节通过可视化方式呈现工况 1~5 的 DDT (Deflagration to detonation)过程。图 6 为工况 1 的爆轰起爆过程, 其中[a]为温度云图, [b]为压力云图, [c]为密度梯度幅值云图。在  $t = 3.76$  ms 时刻, 火焰通过 OB4 后在其前方形成压缩激波。当该激波经过 OB5 时, 向后产生反射波 RW1, 同时前导激波 LSW 向前传播。至  $t = 3.80$  ms 时刻, 压缩波持续与反射波相互作用。在  $t = 3.84$  ms 时刻, 当火焰抵达 OB5 顶端时发生爆燃。到  $t = 3.86$  ms 时刻, 形成向前传播的爆

轰波 DW。最终在  $t = 3.88 \text{ ms}$  时刻，爆轰波 DW 追上前导激波 LSW，形成稳定传播的爆轰波。

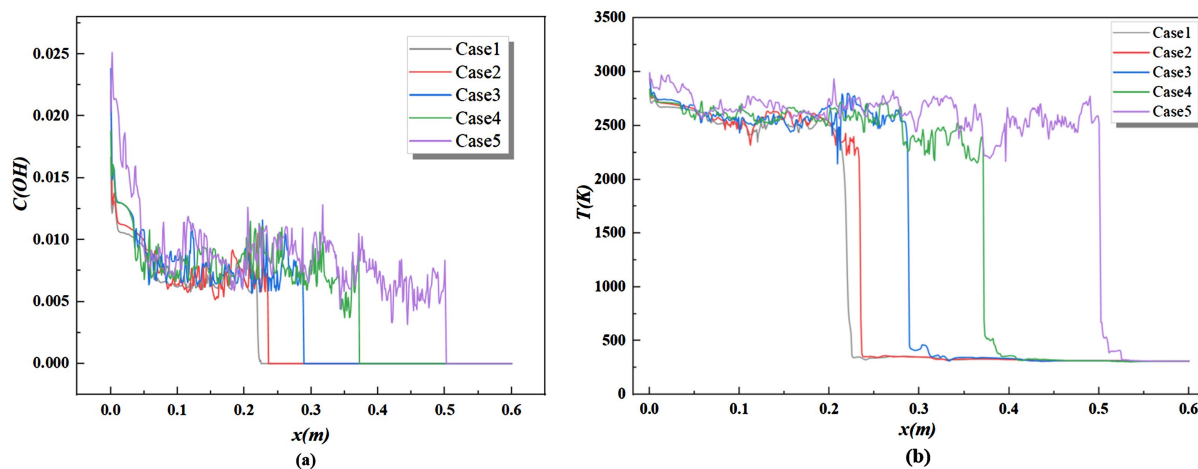


Figure 5. Parameter changes of the flame after passing through obstacles of different shapes

图 5. 火焰通过不同形状障碍物后的参数变化

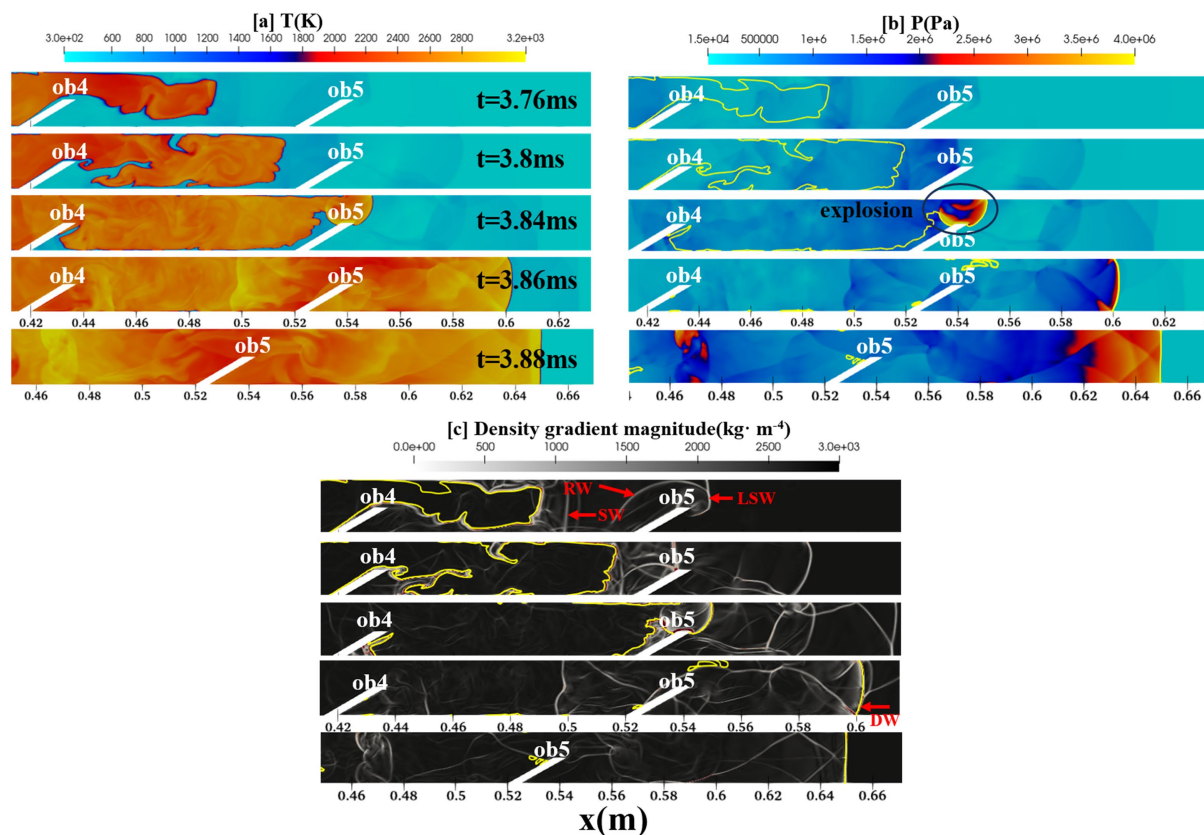


Figure 6. DDT sequence diagram for operating condition 1

图 6. 工况 1 的 DDT 序列图

图 7 展示了工况 2 的爆燃转爆轰过程。在  $t = 3.7 \text{ ms}$  时刻，火焰通过 OB4 后持续膨胀，在前方产生压缩激波，并在 OB5 左端形成反射波 RW1。至  $t = 3.72 \text{ ms}$  时刻，压缩波与反射波持续相互作用，导致局部高温高压热点 H1 的形成。但由于 H1 附近缺乏足够的新鲜预混气体，该热点未发展成爆轰。在  $t = 3.74$

ms 时刻, 随着火焰持续发展, OB5 左端形成高压区 HPZ, 同时产生新的高温高压热点 H2。热点 H2 迅速消耗其后部的新鲜预混气体, 导致温度与压力升高。随后在  $t = 3.76$  ms 时刻, 当火焰穿过高压区 HPZ 时发生局部爆炸, 产生向前传播的爆轰波 DW 和反射波 RW2。随着时间演进, 形成的弯曲爆轰波最终追上前行激波, 形成稳定的平面爆轰波。

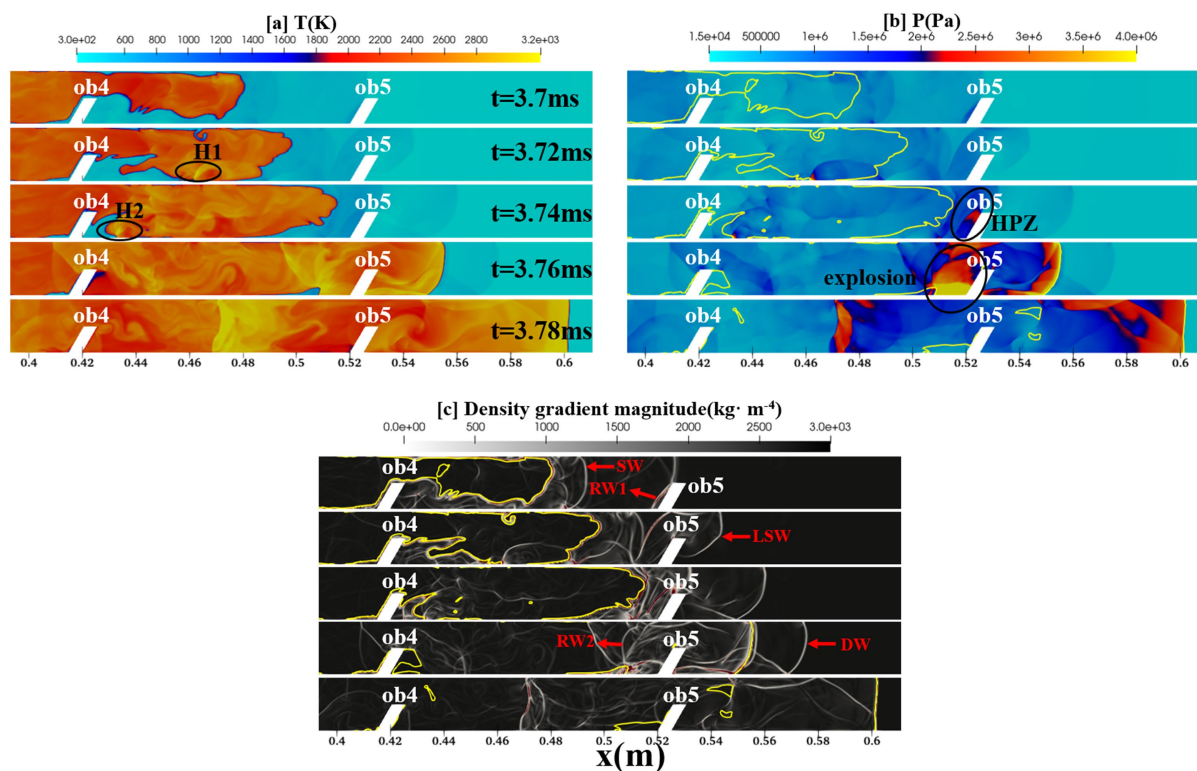


Figure 7. DDT sequence diagram for operating condition 2

图 7. 工况 2 的 DDT 序列图

图 8 展示了工况 3 的爆燃转爆轰过程。在  $t = 3.40$  ms 至  $t = 3.42$  ms 期间, 火焰经过 OB3 并在前方产生压缩激波。此外, 障碍物 OB4 产生的反射波 RW1 与火焰前锋相互作用引发 R-T 不稳定性, 该效应增大了火焰表面积, 进一步提升了燃烧速率和火焰速度。随着激波增强, 激波后方温度升高也促进了燃烧速率的提升, 此时前导激波 LSW 通过 OB5。至  $t = 3.44$  ms 时刻, 压缩波与反射波的持续相互作用导致 OB4 左端形成高压区。在  $t = 3.46$  ms 时刻, 当火焰穿越该高压区时, 在 OB5 的影响下产生强烈反射波 RW2。火焰与高压区相互作用时发生局部爆炸并形成蘑菇云形结构, 产生的爆轰波 DW 穿过 OB4。到  $t = 3.48$  ms 时刻, 爆轰波追上前行激波, 形成稳定的平面爆轰波。

图 9 展示了工况 4 的爆燃转爆轰过程。在  $t = 3.28 \sim 3.30$  ms 期间, 火焰通过 OB4 后持续膨胀, 增大的火焰表面积使前方不断产生压缩波。至  $t = 3.31$  ms 时刻, OB4 左端形成小型高压区。随后在  $t = 3.32$  ms 时刻, 火焰前锋处出现局部高温高压热点 H1, 同时前导激波通过 OB4。热点 H1 迅速消耗其前方的新鲜预混气体, 导致温度与压力上升。最终在  $t = 3.34$  ms 时刻发生爆炸, 形成稳定传播的爆轰波。

图 10 展示了案例 5 的爆燃转爆轰过程。火焰通过 OB4 后持续膨胀, 至  $t = 3.26$  ms 时在前方产生连续压缩波。在  $t = 3.28$  ms 时刻, 前导激波通过 OB5, 同时在 OB5 左侧形成向下传播的反射波。到  $t = 3.29$  ms 时刻, 火焰持续发展与压缩波的叠加效应使 OB5 左端形成高压区。随后在  $t = 3.30$  ms 时刻, 火焰穿越高压区时发生爆炸, 产生爆轰波。至  $t = 3.31$  ms 时刻, 爆轰波追上前行激波, 最终形成稳定的平面爆轰波。

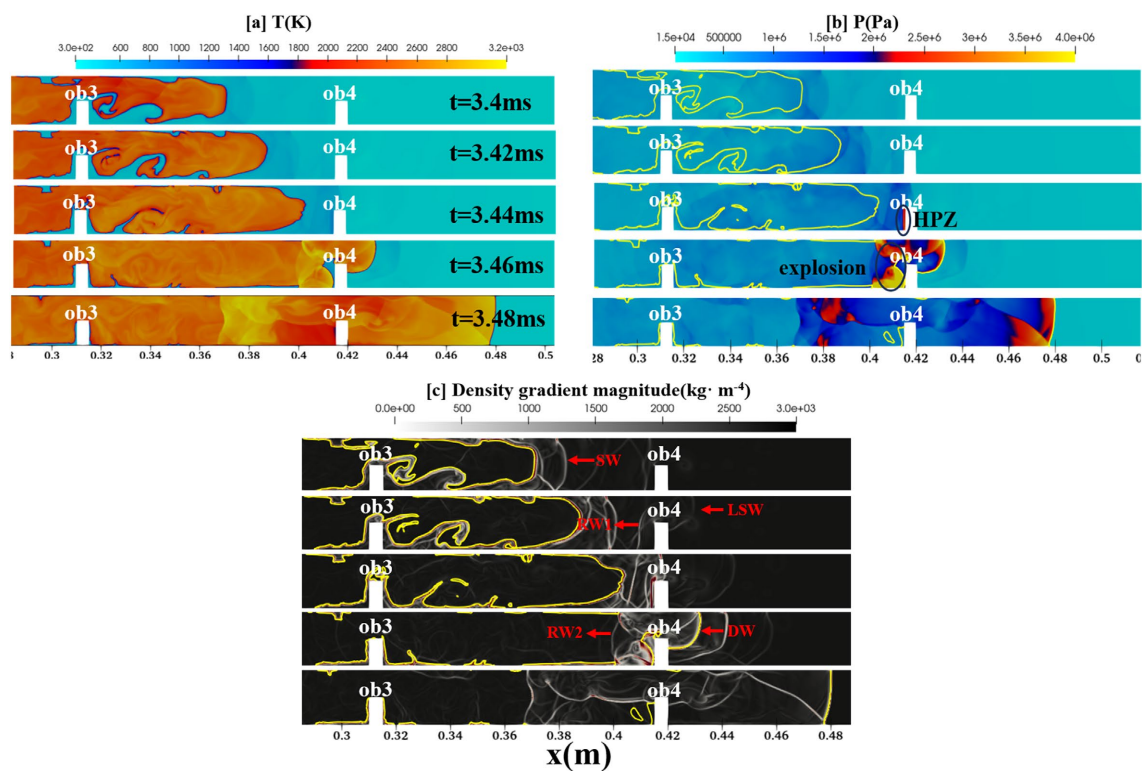


Figure 8. DDT sequence diagram for operating condition 3

图 8. 工况 3 的 DDT 序列图

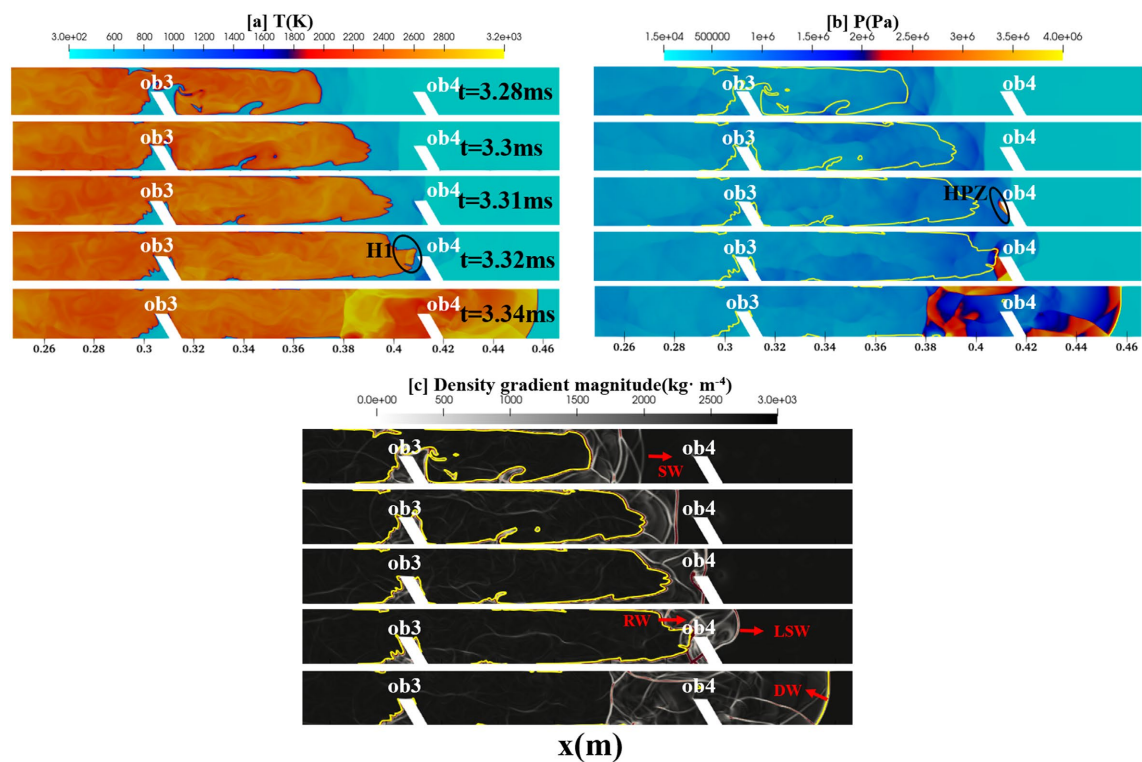


Figure 9. DDT sequence diagram for operating condition 4

图 9. 工况 4 的 DDT 序列图

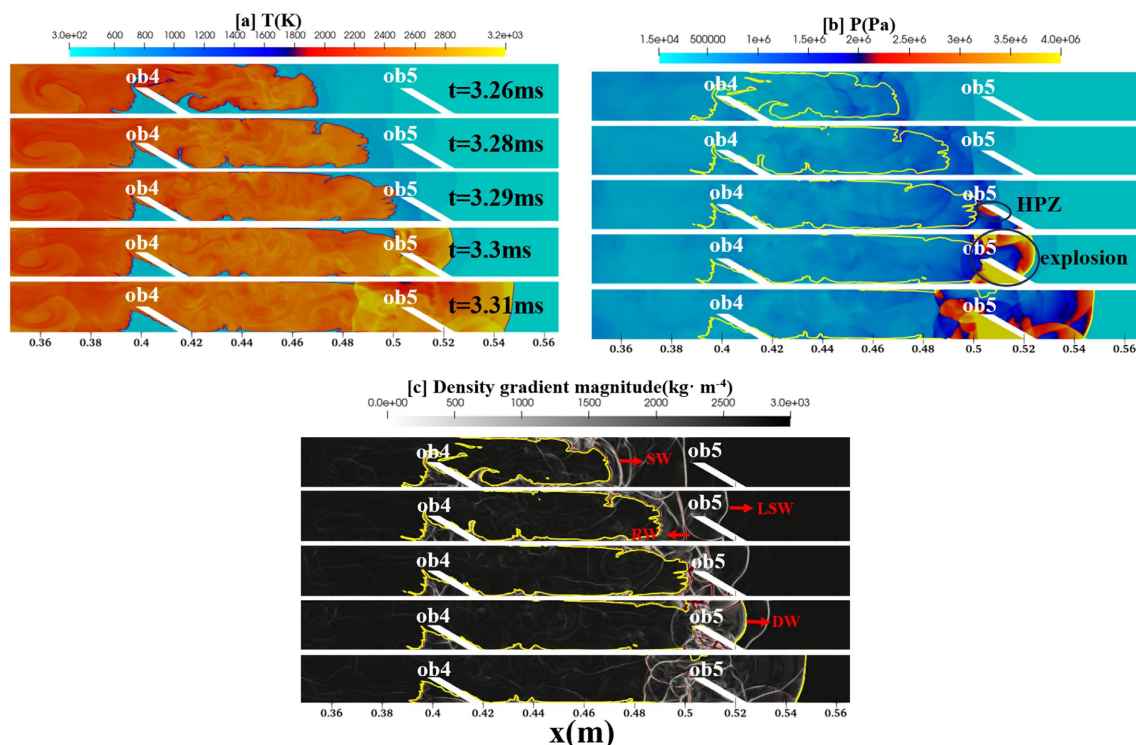
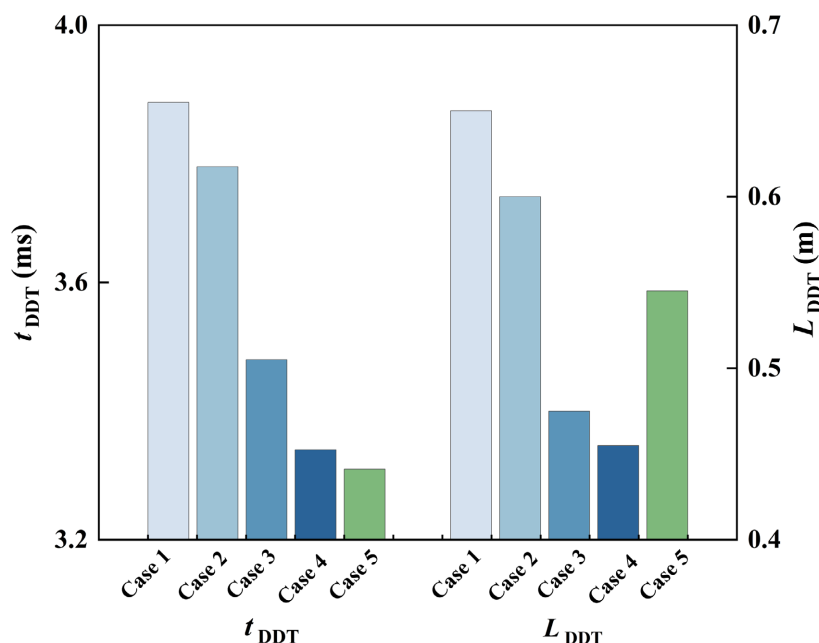


Figure 10. DDT sequence diagram for operating condition 5

图 10. 工况 5 的 DDT 序列图

为更直观分析不同角度障碍物对爆燃转爆轰过程的影响，图 11 对比了工况 1 至 5 的起爆时间与起爆距离。从图中可见障碍物角度对起爆特性具有显著影响：随着角度增大，起爆时间总体呈现缩短趋势。具体而言，小角度障碍物( $30^\circ$ 与  $60^\circ$ )产生的涡旋尺度较小、能量较低，绕流过程中仅发生温和偏转，导致流动分离较弱且回流区受限，主要诱发弱 Kevin-Helmholtz 不稳定性，产生的涡旋能量不足，无法有效将火焰撕裂并大幅增加其表面积，因此火焰加速效果弱，DDT 需要较长距离。此外该构型不利于压力波的强烈反射与聚焦，难以形成有效热点，致使火焰加速效果相对较弱，需要较长距离才能达到爆轰速度。相比之下，中等偏大角度障碍物( $90^\circ$ 与  $120^\circ$ )具有近乎垂直的冲击面，显著增强了对流场的阻滞与扰动作用。所形成的回流区更为局促，能有效促进压力波在障碍物下游的反射、叠加与聚焦，另外  $90^\circ$ 和  $120^\circ$ 障碍物同时激发了强烈的 Kevin-Helmholtz 不稳定性(主导涡旋生成和火焰褶皱) 和由压力波驱动的 R-T 不稳定性(主导界面混合和热点形成)。这两种不稳定性与压力波场形成正反馈循环，在障碍物近场创造了最有利于 DDT 的条件，因此起爆时间和距离最短。而  $150^\circ$ 障碍物在冲击前上游即产生显著流动分离，R-T 不稳定性在宏观尺度上主导了初始的火焰加速，通过在“U 形回流囊”入口处的剧烈卷吸实现。然而，其几何形状抑制了近场压力波的聚焦，使得由压力梯度驱动的、用于形成起爆热点的微观 R-T 不稳定性与局部高温高压条件被削弱。因此，尽管整体流动和火焰被极大地加速，但起爆这一临界事件需要依赖下游更复杂的波-涡-火焰相互作用才能完成，导致起爆距离较长，但一旦卷吸完成，起爆时间极短。

总体而言，障碍物角度通过改变流场结构与压力波聚焦特性共同调控爆燃转爆轰过程：小角度障碍物因湍流强度不足与波聚焦能力欠缺，爆燃转爆轰效率最弱； $150^\circ$ 大角度障碍物虽能快速火焰加速，但其开放流场结构抑制了近场压力波聚焦，导致起爆位置延后；而  $90^\circ$ 与  $120^\circ$ 障碍物在湍流生成与压力波聚焦之间达到最佳平衡，因而能实现高效稳定的近场起爆。



**Figure 11.** Comparison of detonation time and detonation distance (conditions 1~5)

**图 11.** 起爆时间和起爆距离的比较(工况 1~5)

## 4. 结论

本研究采用开源软件 OpenFOAM, 运用大涡模拟方法对不同角度障碍物通道内火焰加速与爆燃转爆轰现象开展了数值研究。获得的主要结论如下:

(1) 障碍物角度对火焰加速过程具有显著影响。角度变化会改变涡旋结构及回流区的卷吸与拉伸效应, 从而增大火焰表面积和总热释放率, 进而增强火焰加速效果。较大角度障碍物会产生更大尺度的涡旋结构, 增强的卷吸效应使火焰形态更趋复杂分散。快速燃烧阶段对障碍物角度尤为敏感, 火焰传播速度与角度呈正相关关系。

(2) 适中角度能显著提升爆轰起爆性能。总体而言, 随着角度增大, 起爆时间与起爆距离均呈现缩短趋势, 起爆效果更优。这源于较大角度产生的更强涡旋和回流区促进了压力波在障碍物近端的高效反射、叠加与聚焦。同时, 倾斜结构改变了激波的反射角度, 使其更频繁快速地与壁面碰撞, 从而加速起爆进程。

(3) 过大的角度虽增强湍流但抑制近场起爆。当角度过大时(如  $150^\circ$ ), 虽然强烈涡旋能显著提升火焰速度, 但开放的流场结构会抑制障碍物近端的压力波聚焦和热点形成。压力波更易向下游发散而难以在近障碍物区域有效反射聚焦, 导致需要更长距离才能实现爆轰。

## 基金项目

重庆科技大学研究生创新计划基金资助项目(YKJCX2420708)。

## 参考文献

- [1] Liu, Z. and Damilola, G. (2021) Theme Report on Energy Transition. 7th Edition, United Nations Department of Economic and Social Affairs United Nations.
- [2] Franzmann, D., Heinrichs, H., Lippkau, F., Addanki, T., Winkler, C., Buchenberg, P., *et al.* (2023) Green Hydrogen Cost-Potentials for Global Trade. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 33062-33076.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.012>
- [3] Sheng, Z., Yang, G., Li, S., Shen, Q., Sun, H., Jiang, Z., *et al.* (2022) Modeling of Turbulent Deflagration Behaviors of Premixed Hydrogen-Air in Closed Space with Obstacles. *Process Safety and Environmental Protection*, **161**, 506-519. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.044>
- [4] Shchelkin, K. (1947) Occurrence of Detonation in Gases in Roughwalled Tubes. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **17**, 29.
- [5] Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., *et al.* (2021) Review on Hydrogen Safety Issues: Incident Statistics, Hydrogen Diffusion, and Detonation Process. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 31467-31488. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>
- [6] Hu, Q., Zhang, X. and Hao, H. (2023) A Review of Hydrogen-Air Cloud Explosions: The Fundamentals, Overpressure Prediction Methods, and Influencing Factors. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 13705-13730. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.302>
- [7] Na'inna, A.M., Phylaktou, H.N. and Andrews, G.E. (2013) The Acceleration of Flames in Tube Explosions with Two Obstacles as a Function of the Obstacle Separation Distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**, 1597-1603. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.003>
- [8] Porowski, R. and Teodorczyk, A. (2013) Experimental Study on DDT for Hydrogen-Methane-Air Mixtures in Tube with Obstacles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**, 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.06.004>
- [9] Sheng, Z., Yang, G., Gao, W., Li, S., Shen, Q. and Sun, H. (2023) Study on the Dynamic Process of Premixed Hydrogen-Air Deflagration Flame Propagating in a Closed Space with Obstacles. *Fuel*, **334**, 126542. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126542>
- [10] Sheng, Z., Yang, G., Gao, W., Li, S., Shen, Q. and Sun, H. (2024) Modeling of Non-Homogeneous Premixed Hydrogen-Air Flame Acceleration and Deflagration to Detonation Transition in an Obstructed Channel. *International Journal of Hydrogen Energy*, **50**, 1209-1222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.036>
- [11] Wang, J., Zhao, X., Gao, L., Wang, X. and Zhu, Y. (2022) Effect of Solid Obstacle Distribution on Flame Acceleration and DDT in Obstructed Channels Filled with Hydrogen-Air Mixture. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 12759-12770. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.035>
- [12] Ibrahim, S.S. and Masri, A.R. (2001) The Effects of Obstructions on Overpressure Resulting from Premixed Flame Deflagration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**, 213-221. [https://doi.org/10.1016/s0950-4230\(00\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(00)00024-3)
- [13] Zhang, K., Wang, Z., Ni, L., Cui, Y., Zhen, Y. and Cui, Y. (2017) Effect of One Obstacle on Methane-Air Explosion in Linked Vessels. *Process Safety and Environmental Protection*, **105**, 217-223. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.004>
- [14] Maeda, S., Minami, S., Okamoto, D. and Obara, T. (2016) Visualization of Deflagration-To-Detonation Transitions in a Channel with Repeated Obstacles Using a Hydrogen-Oxygen Mixture. *Shock Waves*, **26**, 573-586. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0660-1>
- [15] Escofet-Martin, D., Chien, Y., Dunn-Rankin, D., Dzieminska, E., Hayashi, A.K. and Hanada, S. (2019) Flame Propagation in a Narrow Closed Channel: Effects of Aspect Ratios, Blockage Ratio, and Mixture Reactivity on Flame Speed and Pressure Dynamics. *Combustion Science and Technology*, **192**, 986-996. <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1604516>
- [16] Brunoro Ahumada, C., Mannan, M.S., Wang, Q. and Petersen, E.L. (2022) Hydrogen Detonation Onset behind Two Obstructions with Unequal Blockage Ratio and Opening Geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 31468-31480. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.050>
- [17] Masri, A.R., Ibrahim, S.S., Nehzat, N. and Green, A.R. (2000) Experimental Study of Premixed Flame Propagation over Various Solid Obstructions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **21**, 109-116. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(99)00060-6)
- [18] Zhou, Y., Bi, M. and Qi, F. (2012) Experimental Research into Effects of Obstacle on Methane-Coal Dust Hybrid Explosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **25**, 127-130. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.07.003>
- [19] Cao, X., Wei, H., Wang, Z., Wang, Y., Fan, L. and Lu, Y. (2022) Effect of Obstacle on the H<sub>2</sub>/Co/Air Explosion Characteristics under Lean-Fuel Conditions. *Fuel*, **319**, Article ID: 123834. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123834>
- [20] Oh, K., Kim, H., Kim, J. and Lee, S. (2001) A Study on the Obstacle-Induced Variation of the Gas Explosion Characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**, 597-602. [https://doi.org/10.1016/s0950-4230\(01\)00054-7](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(01)00054-7)
- [21] Bychkov, V., Valiev, D. and Eriksson, L. (2008) Physical Mechanism of Ultrafast Flame Acceleration. *Physical Review Letters*, **101**, Article ID: 164501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.164501>
- [22] Valiev, D., Bychkov, V., Akkerman, V., Law, C.K. and Eriksson, L. (2010) Flame Acceleration in Channels with

- Obstacles in the Deflagration-To-Detonation Transition. *Combustion and Flame*, **157**, 1012-1021. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.12.021>
- [23] Wang, J.B. (2024) Numerical Study on Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition Affected by the Solid Obstacles with Different Shapes. *Applied Thermal Engineering*, **124296**, 1359-4311.
- [24] Conaire, M.O., Curran, H.J., Simmie, J.M., Pitz, W.J. and Westbrook, C.K. (2004) A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation. *International Journal of Chemical Kinetics*, **36**, 603-622. <https://doi.org/10.1002/kin.20036>
- [25] Karlsson, A. (1995) Modeling Auto-Ignition, Flame Propagation and Combustion in Non-Stationary Turbulent Sprays (Chalmers University of Technology). <https://research.chalmers.se/en/publication/1332#:~:text=This%20thesis%20focuses%20on%20detailed%20numerical%20studies%20of, and%20combustion%20in%20a%20simple%20two-dimensional%20axi-symmetric%20geometry>
- [26] Spiteri, R.J. and Ruuth, S.J. (2002) A New Class of Optimal High-Order Strong-Stability-Preserving Time Discretization Methods. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **40**, 469-491. <https://doi.org/10.1137/s0036142901389025>
- [27] Boeck, L.R., Katzy, P., Hasslberger, J., Kink, A. and Sattelmayer, T. (2016) The Gravent DDT Database. *Shock Waves*, **26**, 683-685. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0629-0>
- [28] Ettner, F., Vollmer, K.G. and Sattelmayer, T. (2014) Numerical Simulation of the Deflagration-To-Detonation Transition in Inhomogeneous Mixtures. *Journal of Combustion*, **2014**, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/686347>