

# 扇形脉冲爆震燃烧室起爆过程数值模拟

张佳博, 郑龙席, 卢杰, 彭辰旭, 罗振坤  
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

**摘要:** 为了探究不同障碍物结构对扇形脉冲爆震燃烧室起爆过程的影响, 对采用 3 种典型孔板障碍物的扇形脉冲爆震燃烧室, 截取其中间截面进行了起爆过程的数值模拟, 研究了障碍物型式、障碍物堵塞比及障碍物间距对扇形脉冲爆震燃烧室爆燃转爆震 (DDT) 距离的影响规律。结果表明: 障碍物堵塞比对扇形脉冲爆震燃烧室 DDT 距离的影响最大, 且在堵塞比为 0.35~0.70 时, 堵塞比越高 DDT 距离越短; 在 3 种型式的障碍物中, 在低堵塞比下, 截面为前掠三角形的障碍物缩短 DDT 距离的效果最好, 在高堵塞比下, 截面为后掠三角形的障碍物缩短 DDT 距离的效果最好; 在 3 种障碍物间距中, 当间距分别等于 1 倍和 1.2 倍的爆震室当量直径时, 扇形脉冲爆震燃烧室的 DDT 距离相差不大, 且均短于障碍物间距等于 0.8 倍爆震室当量直径时的 DDT 距离。

**关键词:** 扇形脉冲爆震燃烧室; 爆燃转爆震; 障碍物; 堵塞比; 数值模拟; 航空发动机

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.007

## Numerical Simulation of Detonation Initiation in Sector Pulse Detonation Combustor

ZHANG Jia-bo, ZHENG Long-xi, LU Jie, PENG Chen-xu, LUO Zhen-kun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of different obstacle structures on the initiation process of a sector pulse detonation combustor, numerical simulations of the initiation processes in the middle cross-section of the sector pulse detonation combustor with three types of typical orifice plate obstacles were carried out, and the influences of the type, blockage ratio, and spacing of the obstacles on the deflagration to detonation transition (DDT) distance of the sector pulse detonation combustor were studied. The results show that the obstruction blockage ratio has the greatest influence on DDT distance, and the higher the blockage ratio, the shorter the DDT distance within the blockage ratio range of 0.35~0.70. Among the three types of obstacles, the obstacles with a swept-forward triangle section have the best effect on shortening DDT distance at a low blockage ratio and those with a swept-back triangle section have the best effect on shortening DDT distance in the case of high blockage ratio. Among the three spacings, the DDT distances have little difference when the obstacle spacings are 1 and 1.2 times the equivalent diameter of the detonation combustor, and both of them are shorter than the DDT distance when the obstacle spacing is 0.8 times the equivalent diameter of detonation combustor.

**Key words:** sector pulse detonation combustor; deflagration to detonation transition; obstacle; blockage ratio; numerical simulation; aeroengine

## 0 引言

脉冲爆震涡轮发动机 (Pulse Detonation Turbine Engine, PDTE) 作为新一代动力装置, 与传统燃气涡轮发动机相比, 其循环热效率更高、单位推力更大、耗油率更低<sup>[1-3]</sup>, 对于亚、超声速飞行都有很大的优势。但实现 PDTE 的优势必须解决爆震波的短距起爆问题。目前最接近实际工程应用的爆燃转爆震

(Deflagration to Detonation Transition, DDT) 方法需要一定距离和时间来积累爆炸, 这导致光管中的起爆距离过长, 所以必须采取措施来缩短 DDT 距离<sup>[4-5]</sup>。常见的缩短 DDT 距离的方法主要是在爆震管内置入各种各样的障碍物扰流装置 (例如螺旋、形状各异的突出障碍物, 孔板等), 障碍物的型式和布置方式存在很大的优化空间。此外, 由于在大管径圆管中触发爆震波较为困难, 采用多管组合形式的脉冲爆震发动机是

收稿日期: 2022-11-22

作者简介: 张佳博 (2000), 男, 在读硕士研究生。

引用格式: 张佳博, 郑龙席, 卢杰, 等. 扇形脉冲爆震燃烧室起爆过程数值模拟[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 53-57. ZHANG Jiabo, ZHENG Longxi, LU Jie, et al. Numerical simulation of detonation initiation in sector pulse detonation combustor[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 53-57.

PDTE工程应用的趋势<sup>[6]</sup>,目前研究的多管爆震燃烧室大都由多个圆形截面爆震管组成,而由于发动机内、外涵气流通道均为环形,采用扇形截面爆震室相较于圆截面爆震室能显著提高环形气流通道的截面利用率(爆震室入口面积与发动机环形气流通道面积之比),完美匹配流道形状,若不考虑爆震室壁面冷却,截面利用率接近100%。

Goodwin等<sup>[7]</sup>通过数值计算研究了堵塞比对火焰加速过程的影响,表明障碍物堵塞比(流动方向上障碍物的最大横截面积与爆震管截面积之比)为0.3~0.6时可以有效地加快DDT过程,超出这一区间会使DDT距离急剧延长;周宁等<sup>[8]</sup>研究了障碍物阻塞比、障碍物间距、障碍物空间位置对丙烷-空气爆炸过程及火焰加速效应的影响,表明随着障碍物阻塞比的增大,加速作用呈现先加快后减缓的趋势,阻塞比为0.7时,火焰加速效果最佳,阻塞比为0.5~0.7时,障碍物间距才会影响火焰的加速效果;Gamezo等<sup>[9]</sup>通过数值计算研究了障碍物间距对DDT过程的影响,表明障碍物间距等于管径时的效果较好,障碍物间距过小会抑制爆震波的形成,障碍物间距过大会导致DDT距离延长;陈道阳等<sup>[10]</sup>基于半开口的2维数值计算结果,指出相邻障碍物间距较大时,压力梯度差会抑制火焰增速,障碍物间距较小时,火焰流经相邻障碍物的间隔时间过短,火焰得不到充分加速就再次受到干扰,不利于激波的叠加,造成单位距离内的能量损失过大。上述关于障碍物对DDT距离的影响研究结论之间存在较大差异(尤其是堵塞比对DDT距离的影响规律),且结论大多基于圆截面管得出,对于扇形截面的适用性也需要进一步评估。

本文对采用3种典型孔板障碍物结构(矩形截面,后掠三角形截面,前掠三角形截面)的扇形爆震室进行了起爆过程的数值计算,可为扇形脉冲爆震燃烧室的设计提供一定的指导。

## 1 数值计算方法

### 1.1 物理模型

本文采用的扇形爆震室模型当量直径 $d=65$  mm,扇形张角为 $45^\circ$ ,中间截面高度 $D=75$  mm,总长度 $L=1300$  mm。其中,射流点火段长 $100$  mm,布置有障碍物的主体段 $l=1200$  mm,障碍物厚度 $w=12$  mm,在距爆震室入口 $50$  mm处装有直径 $d_j=20$  mm、高 $h=60$  mm

的圆柱形射流管, $s$ 为障碍物间距。由于扇形爆震室主体段的每个截面的形状、尺寸均完全相同,为节省计算资源,取计算模型基本尺寸(如图1所示)的爆震室中间截面进行起爆过程2维数值模拟。

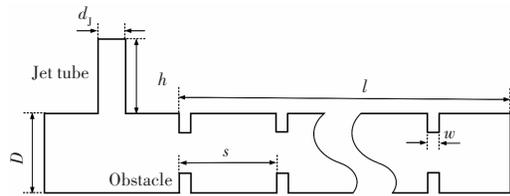


图1 计算模型基本尺寸

采用的3种障碍物模型及其截面形状如图2所示。01型为矩形截面,迎风面与来流垂直;02型为后掠三角形截面,迎风面顺着来流方向向后倾斜,有尖锐的边缘;03型是前掠三角形截面,迎风面与来流垂直,有尖锐边缘。



图2 3种障碍物模型及其截面形状

参考对障碍物堵塞比和障碍物间距的相关研究<sup>[8-10]</sup>结论,选定堵塞比和间距为:

(1) 8个障碍物堵塞比: 0.35、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60、0.65、0.70;

(2) 3种障碍物间距:  $0.8d$  (52 mm)、 $1d$  (65 mm)、 $1.2d$  (78 mm)。

上述各种障碍物型式、堵塞比和间距之间互相组合,共计 $3 \times 8 \times 3 = 72$ 个爆震室计算模型。为了描述方便,下文采用“障碍物型式-堵塞比-布置间距”的形式表示爆震室计算模型,例如“03-0.55- $1.2d$ ”表示爆震室内布置03型障碍物,堵塞比为0.55,布置间距为 $1.2d$ 。

### 1.2 计算域网格

由于爆震波传播速度较快,为了很好地捕捉到爆震波,必须采用很细的网格尺寸。根据文献[11]的网格无关性验证结果,在网格尺寸小于 $0.5$  mm时,爆震燃烧过程的计算结果与网格尺寸无关。由于计算资源有限,对于本章中的计算模型,平均网格尺寸选取 $0.5$  mm。

### 1.3 计算方法与边界条件

采用基于有限体积法的计算流体力学软件 ANSYS Fluent 对本文研究的问题进行数值模拟,采用对瞬态问题有明显优势的 PISO 算法对可压缩粘性流动的 N-S 方程进行求解。湍流模型选取计算较为简单、工程应用中模型精度较高的标准 k-epsilon 模型,采用标准壁面函数对进壁面区域进行处理。采用基础燃料物质组成之一的正庚烷<sup>[12-13]</sup>作为单一组分燃料进行爆震燃烧模拟,燃烧反应的氧化剂为空气,起爆过程的化学反应采用 5 组分单步有限速率模型,认为化学反应速率仅由 Arrhenius 公式计算得到,这与爆震的 ZND 结构的假设一致。空间离散格式采用拥有较高精度的 2 阶迎风格式,时间离散格式为 1 阶隐式时间积分方案。根据 Xisto 等<sup>[14]</sup>的研究,非稳态数值模拟时为保证数值计算稳定性,爆震燃烧的时间步长应选取为  $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$  s,为节省计算时间,本文起爆过程模拟的时间步长选取  $1 \times 10^{-7}$  s。

先采用冷态数值计算确定爆震室初始流场。爆震室入口设为质量流量入口,质量流量为 0.36 kg/s,入口总温为 500 K,按当量比 1 均匀混合的正庚烷-空气混合物从该入口进入爆震室内。爆震室出口边界设为压力出口边界,出口压力为 0.1 MPa,温度为 300 K。其余边界均为无滑移绝热壁面,不考虑热量损失和壁面附近边界层。

冷态数值计算确定爆震室初始流场后进行起爆过程的数值模拟。将爆震室头部封闭作为推力壁,即将入口条件改为绝热无滑移壁面。采用 Fluent 内置的火花塞模型进行点火,点火位置位于射流管顶部,点火直径为 2 mm,点火能量为 50 mJ,点火持续时间为 1 ms。

## 2 数值模拟方法验证与模拟结果分析

“03-0.50-1d”爆震室起爆过程的温度与压力梯度分布如图 3 所示,左图为温度分布,右图为压力梯

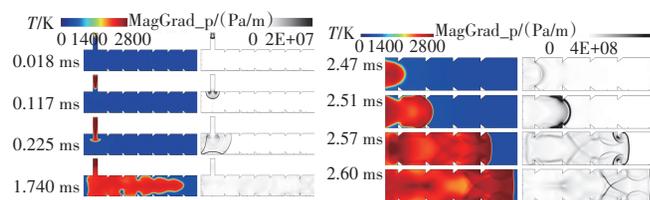


图 3 “03-0.50-1d”爆震室起爆过程的温度

度分布。起爆阶段“03-0.50-1d”爆震室中心线上的压力分布如图 4 所示。从图 3 中可见,点火开始后,在点火位置形成了初始火焰,并在射流管内形成一系列的弱压缩波,以球形面向射流管出口扩张;在第 0.117 ms 时,弱压缩波已经传出射流管,而火焰速度较慢,还未到达射流管出口;在第 0.225 ms 时,弱压缩波到达爆震室左壁面和下壁面,与壁面碰撞后发生反射,对传出射流管的火焰产生扰动作用,火焰面出现褶皱,燃烧速度有所增加;在第 1.740 ms 时,火焰已经过了 5 个障碍物,受障碍物影响,火焰面受拉伸作用而形成舌形结构,传播速度持续增加;在第 2.470 ms 时,火焰已基本与压缩波重合,在第 13 个障碍物处产生了称为爆炸中心的局部高压点(1.3 MPa);在第 2.510 ms 时,在距离第 1 个障碍物约 850 mm 的位置,火焰锋面与压力波耦合形成过驱爆震。从图 4 中可见,爆震室中心线上的压力峰值为

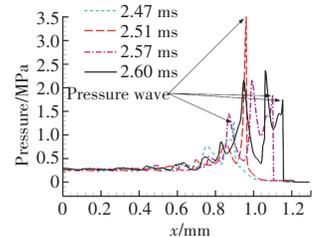


图 4 起爆阶段“03-0.50-1d”爆震室中心线上的

3.5 MPa;在第 2.57 ms 时,爆震波越过最后 1 个障碍物向爆震室出口传播,爆震波峰值衰减至 1.8 MPa;在第 2.60 ms 之后,爆震波波面由曲面转变为平面,峰值压力基本保持在 1.8 MPa,形成自持传播。

“03-0.50-1d”爆震室出口压力随时间的变化如图 5 所示。从图中可见,爆震波在第 2.7 ms 时到达爆震室出口,此时爆震波峰值压力为 1.8 MPa,爆震波传播速度为 1882.9 m/s,与理论 C-J 压力 1.85 MPa 和 C-J 波速 1792.9 m/s 分别相差 2.7% 和 5%,说明了本文计算模型的正确性。在爆震波传出爆震室后,经过 0.8 ms,爆震室出口压力恢复到初始水平。

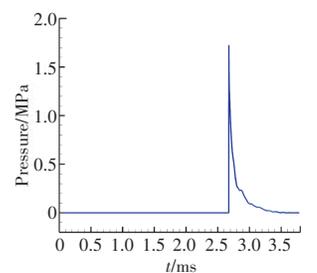


图 5 “03-0.50-1d”爆震室出口压力随时间的变化

采用同样的方法对全部 72 种不同结构爆震室的 DDT 过程进行数值模拟计算,得到其 DDT 距离数据,分析障碍物型式、布置间距及堵塞比对爆震室 DDT 距离的影响规律。

(1)障碍物型式对爆震室 DDT 距离的影响规律。障碍物间距  $s$  固定的情况下爆震室的 DDT 距离随障

碍物堵塞比的变化如图6所示。(若曲线在某一堵塞比处没有对应的点,则代表该结构的爆震室未起爆)

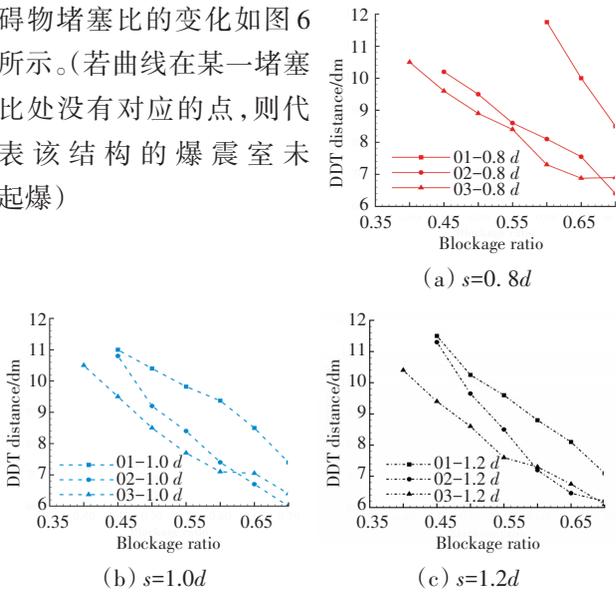


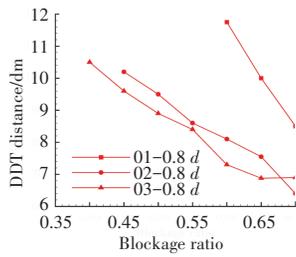
图6 障碍物间距  $s$  在固定情况下爆震室的 DDT 距离

从图中可见,通过比较障碍物间距相同而障碍物型式不同的3条曲线可见,在3种障碍物中01型障碍物的 DDT 距离最长,即01型障碍物的助爆效果最差,根据文献[15]的结论分析其主要原因是02、03型障碍物的尖锐边缘更能增大流场的湍流度,有利于火焰面的褶皱,加速爆震波的形成。

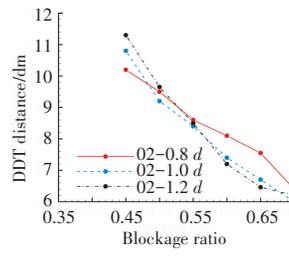
对比02、03型障碍物的助爆效果可见,03型障碍物在堵塞比低时的助爆效果明显优于02型障碍物的,而随着堵塞比的提高,二者助爆效果的差距缩小,在堵塞比高时,02型的助爆效果甚至超过了03型的。分析其可能原因:在堵塞比低时,由于03型障碍物的迎风面垂直于来流方向的,火焰面与其碰撞更剧烈,导致表面褶皱程度更高,反应速率更快,使得其助爆效果更好;在堵塞比高时,由于02型障碍物迎风面能更好反射并向爆震室中心线上汇聚压力波,从而增大了对火焰面的扰动,使得其助爆效果更好。

(2)障碍物间距对爆震室 DDT 距离的影响规律。在固定障碍物型式的情况下爆震室的 DDT 距离随障碍物堵塞比的变化如图7所示。

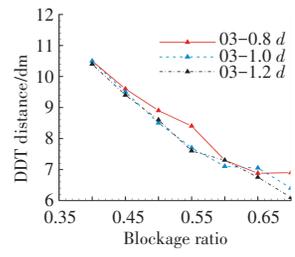
从图中可见,整体上来看,障碍物间距对 DDT 距离的影响较小,不过在障碍物以  $0.8d$  (52 mm) 的间距布置时,助爆效果要差于以  $1.0d$  (65 mm)、 $1.2d$  (78 mm) 布置时的助爆效



(a)  $s=0.8d$



(b) 02型障碍物



(c) 03型障碍物

图7 在固定障碍物型式的情况下爆震室的 DDT 距离随障碍物堵塞比的变化

果,尤其是对01型障碍物来说。分析其原因可能是在间距过小时,障碍物后的涡团占据了整个障碍物间距,火焰在通过障碍物后,此区域还残留大量未反应气体,这些气体在火焰通过后很长时间才开始反应,对 DDT 过程贡献不大。

(3)障碍物堵塞比对爆震室 DDT 距离的影响规律。堵塞比对 DDT 距离的影响最为显著。从图6、7中可见,无论使用哪种型式的障碍物、在哪个布置间距下,爆震室的 DDT 都随着障碍物堵塞比的提高而缩短。随着堵塞比的提高,气流流通面积减小,火焰面经过障碍物时的收缩扩张过程越来越明显,火焰面的拉伸程度越来越大,使反应速率上升,而且越高的障碍物对压力波的反射更强烈,更容易形成局部爆炸点。

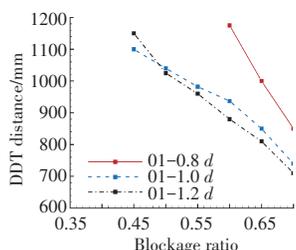
### 3 结论

(1)在障碍物型式、堵塞比和障碍物间距3种因素中,堵塞比对扇形脉冲爆震燃烧室 DDT 距离的影响最为显著,且在堵塞比为0.35~0.70时,堵塞比越高,DDT 距离越短。但在实际选择堵塞比时,堵塞比不是越高越好,因为在缩短 DDT 距离的同时还要兼顾爆震室流动损失及气流流通能力,因此堵塞比的选择受到限制。

(2)在3种型式的障碍物中,在低堵塞比下截面为前掠三角形的障碍物缩短 DDT 距离的效果最好,在高堵塞比下截面为后掠三角形的障碍物缩短 DDT 距离的效果最好,但无论是在哪种堵塞比下,矩形截面障碍物缩短 DDT 距离的效果都最差。

(3)在障碍物间距为  $1d$  和  $1.2d$  时,扇形脉冲爆震燃烧室的 DDT 距离相差不大,且均短于障碍物间距为  $0.8d$  时的 DDT 距离。

评价扇形脉冲爆震燃烧室的性能,除了 DDT 距



(a) 01型障碍物

离这一指标外,还要综合考虑爆震室流动损失和爆震室等效增压比等参数。本文通过数值模拟着重研究了各障碍物结构对 DDT 距离的影响,在后续研究中将评估各障碍物结构的流动损失及爆震室的增压能力。

#### 参考文献:

- [1] 郑龙席,王治武,黄希桥,等.脉冲爆震涡轮发动机技术[M].西安:西北工业大学出版社,2019:2-4.  
ZHENG Longxi, Wang Zhiwu, Huang Xiqiao, et al. Technology of pulse detonation turbine engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019:2-4. (in Chinese)
- [2] Kailasanath K. Research on pulse detonation combustion systems: a status report[R]. AIAA-2009-631.
- [3] Peace J T, Lu F K. Performance modeling of pulse detonation engines using the method of characteristics[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 88(2): 51-64.
- [4] Zhukov V P, Rakitin A E, Starikovskii A Y. Effect of high-voltage pulsed discharge on deflagration to detonation transition[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(1): 88-93.
- [5] Benedick W, Guirao C, Knystautas R, et al. Critical charge for the direct initiation of detonation in mixtures[J]. Prog Astro Aero, 1986, 106(2): 182-202.
- [6] 王治武,严传俊,郑龙席,等.预爆管起爆扇形爆震室试验研究[C]//第二届爆轰与爆震发动机研讨会摘要集.北京:中国力学学会,2011:7.  
WANG Zhiwu, YAN Chuanjun, ZHENG Longxi, et al. Experimental study of detonation initiation in fan-shaped pulse detonation chamber [C]//Abstracts of the 2nd Symposium on Detonation Engines. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2011: 7. (in Chinese)
- [7] Goodwin G B, Houim R W, Oran E S. Effect of decreasing blockage ratio on DDT in small channels with obstacles[J]. Combustion and Flame, 2016, 173: 16-26.
- [8] 周宁,王文秀,张国文,等.障碍物对丙烷-空气爆炸火焰加速的影响[J].爆炸与冲击,2018,38(5):1106-1113.  
ZHOU Ning, WANG Wenxiu, ZHANG Guowen, et al. Effect of obstacles on flame acceleration of propane-air explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1106-1113. (in Chinese)
- [9] Gamezo V N, Ogawa A T, Oran E S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: effect of obstacle spacing [J]. Combustion and Flame, 2008, 155: 302-315.
- [10] 陈道阳,张礼敬,陶刚,等.障碍物对火焰传播过程影响数值模拟[J].工业安全与环保,2012,38(6):35-37.  
CHEN Daoyang, ZHANG Lijing, TAO Gang, et al. Study of obstacles to flame propagation in process of the combustible gas explosion[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(6): 35-37. (in Chinese)
- [11] Wang Z, Yang Y, Huang J, et al. Numerical study of back-propagation suppression and intake loss in an air-breathing pulse detonation engine[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 126(7): 107566.
- [12] 郑朝蕾,尧命发.正庚烷均质压燃燃烧简化动力学模型[J].燃烧科学与技术,2005,11(6):547-553.  
ZHENG Zhaolei, YAO Mingfa. Reduced chemical kinetic model of n-Heptane for HCCI Combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(6): 547-553. (in Chinese)
- [13] Ciezki H K, Adomeit G. Shock-tube investigation of self-ignition of n-heptane-air mixtures under engine relevant conditions[J]. Combustion and Flame, 1993, 93(4): 421-433.
- [14] Xisto C, Petit O, Gronstedt T, et al. The efficiency of a pulsed detonation combustor-axial turbine integration[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 82: 80-91.
- [15] 张宇.脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟研究[D].南京:南京理工大学,2009.  
ZHANG Yu. Numerical simulation of DDT process in pulse detonation engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

(编辑: 兰海青)