

Experimental Research on the Pressure Distribution of Continuous Detonation Engines

Yongsheng Li, Jianping Wang, Tianyi Shi, Yuhui Wang, Yusi Liu, Yang Li

Center for Combustion and Propulsion, Department of Mechanics & State Key Laboratory of Turbulence and Complex System,
Peking University, Beijing
Email: lishimin0226@126.com

Received: Jun. 24th, 2013; revised: Jul. 11th, 2013; accepted: Jul. 16th, 2013

Copyright © 2013 Yongsheng Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In recent years, detonation has become a hot topic of scientific research because of its high combustion efficiency. Continuous detonation engine will be able to form continuous propagation of detonation in the combustion chamber needing only once ignition, which can provide stable high thrust, and becomes an important research direction of aviation propulsion. Based on the continuous detonation experimental equipment of the Center of Combustion and Propulsion Power, Peking University, combined with the experimental data, internal pressure distribution of the continuous detonation engine is studied and the formation, stabilization and annihilation of the continuous detonation are analyzed. Also, the velocity and period of continuous detonation are calculated. All the works lay the foundation for further study of the internal mechanism of continuous detonation engine.

Keywords: Continuous Detonation; Continuous Detonation Engine; The Velocity of Detonation; The Experiment on Detonation

连续爆轰发动机燃烧室内压力分布的实验研究

李永生, 王健平, 石天一, 王宇辉, 刘宇思, 李洋

北京大学工学院燃烧推进中心力学与工程科学系和湍流国家重点实验室, 北京
Email: lishimin0226@126.com

收稿日期: 2013年6月24日; 修回日期: 2013年7月11日; 录用日期: 2013年7月16日

摘要: 近年来, 由于爆轰高效的燃烧方式, 其已成为各国学者关注的焦点。而连续爆轰发动机只需一次点火, 便能在燃烧室内形成连续传播的爆轰波, 从而可以提供持续稳定高推力的优越性能使其成为航空推进的一个重要研究方向。本文基于北京大学燃烧推进动力中心的连续爆轰实验设备, 利用 H_2/O_2 混合燃料, 结合实验数据对连续爆轰发动机内部压力分布进行了实验研究, 分析了连续爆轰形成、稳定和熄灭的过程, 计算了实验中连续爆轰的速度和旋转周期, 为进一步研究连续爆轰发动机内部机理奠定了基础。

关键词: 连续爆轰; 连续爆轰发动机; 爆轰速度; 爆轰实验

1. 引言

早在 18 世纪, 人类已经开始研究燃烧现象, 并且已经开始注意到爆轰。当时人们认为爆轰现象就是一种能够产生类似雷声的开区域爆炸。关于爆轰现象

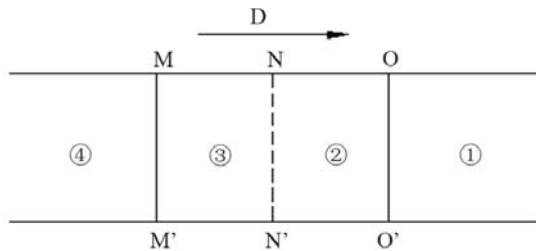
的研究起源于一百多年前人们对煤矿爆炸起因的探索。化学工业中频繁出现的爆炸事故更加引起了人们对爆轰现象研究的重视^[1]。实验室发现爆轰现象是在 19 世纪 80 年代初期, 贝尔特劳(Berthelot)和维也里

(Vieille) 以及马 拉 尔 德 (Mallard) 和 吕 查 特 里 尔 (Le Chatelier) 分别在实验室中发现了爆轰现象^[2], 开创了燃烧学的新领域。上世纪初, Chapman 和 Jouguet 各自独立地提出了关于爆轰波的平面一维流体动力学理论, 也就是 C-J 理论^[3,4]。对 C-J 理论的一个根本性的改进是在 20 世纪 40 年代由 Zeldovich(苏联, 1940)、Von Neumann(美国, 1942)和 Doering(德国, 1943)各自独立提出的。他们提出的模型被称为爆轰波的 ZND 模型^[5]。该模型是基于欧拉的无粘性流体动力学方程, 不考虑输运效应和能量耗散过程, 只考虑化学反应效应, 并把爆轰波看成是由前导激波和紧随其后的化学反应区组成的间断, 如图 1 所示。

2. 研究背景

自从 1940 年 Hoffman^[6]提出以爆轰的燃烧方式提供推力的设想以来, 相关的研究在国内外就从未停止过。人们对爆轰如何产生推力的兴趣越来越浓厚。实现爆轰推进技术的关键是如何稳定高效地将化学反应热能转化为动能。目前, 有三种方式可以达到这一目的, 爆轰发动机也因此分为三类^[7], 即脉冲爆轰发动机(PDE)、斜爆轰发动机(ODE)和连续旋转爆轰发动机(CRDE)。

脉冲爆轰发动机(Pulse Detonation Engines, PDE)是一种使用脉冲式爆轰波产生推力的新概念发动机。它利用在充入混合可燃气体的燃烧室(或爆轰管)的封闭端起爆可燃气体, 产生向开口端传播的爆轰波, 高温高压气体由推力喷管高速膨胀喷出, 从而产生发动机推力。脉冲爆轰发动机循环包括以下几个基本过程: 填充反应物、点火起爆、爆轰波传播、燃烧产物排放^[8]。



①初始爆炸物; O-O'面——前导激波; ②诱导化学反应区; M-M'面——反应终止断面; ③放热化学反应区; ④爆轰产物。

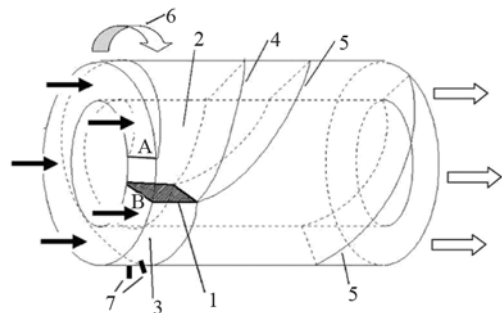
Figure 1. Schematic of detonation
图 1. 爆轰波阵面示意图

连续旋转爆轰发动机(Continuous Rotating Detonation Engines, CRDE)即只需初始起爆一次, 爆轰波便可以持续旋转地传播下去。可燃性气体沿轴向入射, 爆轰波沿圆环腔周向传播, 可燃气入射与爆轰波的传播是相对独立的两个过程^[9], 如图 2 所示。

CRDE 的研究最早可以追溯到上世纪 60 年代, Voitsekhevskii^[10]针对火箭发动机内部不稳定时产生爆轰的现象, 首先提出了推力墙端在特定条件下可实现连续旋转爆轰以产生高效燃烧。俄罗斯 Bykovskii^[11]研究组对各种气体、液体燃料的连续旋转爆轰进行了一系列的理论与实验研究, 证实了连续旋转爆轰的可行性。波兰 Wolanski^[12]研究组在实验中设计出连续火箭爆轰发动机并得到了可观的动力。王健平^[13]研究组在实验中得到了高达 62500 Hz 的连续旋转爆轰波。邵业涛^[14]对连续旋转爆轰进行了详细的数值模拟研究, 周蕊^[15]在连续爆轰发动机中的热力学性质和粒子运动轨迹方面做出了突出的贡献。

北京大学燃烧推进中心通过多年的探索, 自主设计出能够持续稳定产生连续爆轰的燃烧室^[16], 利用氧气和空气作为氧化剂、氢气作为燃料进行了不同组分不同配比的爆轰实验, 并通过在燃烧室环向和轴向布置压力传感器, 测得了燃烧室内压力场的分布和随时间的变化情况。

图 3 中所示的连续爆轰发动机示意图中 1 为爆轰波面, 5 为斜激波, 爆轰波沿箭头指示方向传播。新鲜的燃料和氧化剂的混合物从左侧冲入, 其中 AB 段由于和爆轰波高压区相邻无法冲入燃料, 但是其余圆周方向由于压力较低, 燃料和氧化剂的混合物得以顺利注入, 并把该段的反应产物推出燃烧室。



1 爆轰波; 2 爆轰产物; 3 未燃燃料混合气;
4 滑移线; 5 斜激波; 6 爆轰波传播方向

Figure 2. Schematic of CRDE
图 2. 连续旋转爆轰发动机示意图

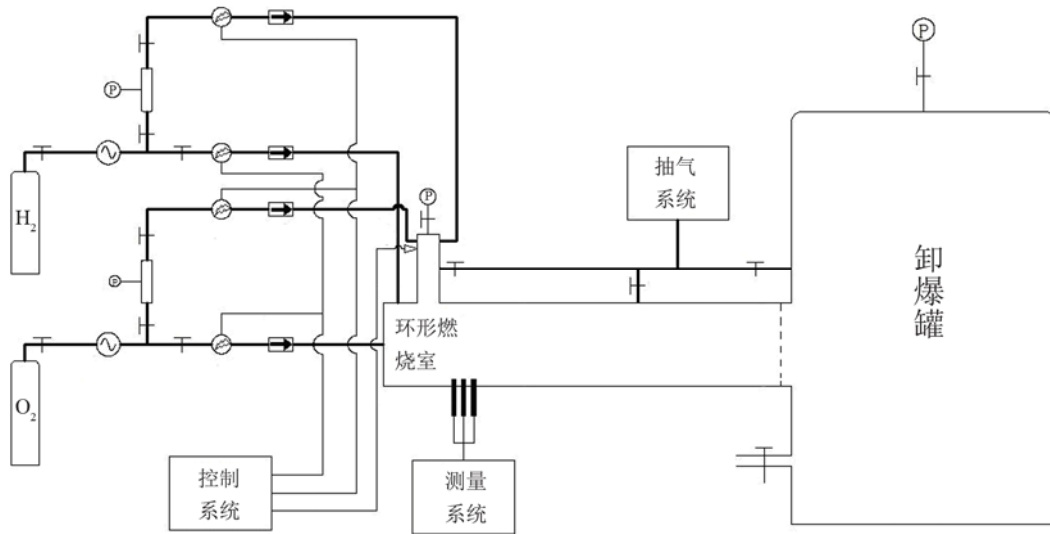


Figure 3. Distribution of experimental equipment
图 3. 实验设备布置图

在图 2 中，爆轰波沿腔体环向传播，我们可以在 7 处所对应的外壁上打孔装入压力传感器，通过压力传感器测出的数值就可以读出爆轰波扫过时候的压力值。而如果连续旋转爆轰得以进行，那么实验中测得周期稳定的跟锯齿波比较相似的波形，另一方面，如果在 7 处布置两个环向距离已知的传感器，那么通过两个传感器记录得到的波峰的时间差，可以计算爆轰波传播的速度，通过与理论计算所得的速度进行比较，可以在理论上证明得到的波形就是爆轰波扫过所形成的，这也是证明爆轰波的一个重要的方法。再通过改变传感器轴向位置，那么就可以测得沿着燃烧室轴向压力的变化情况。

本文正是基于以上的考虑，利用燃烧推进中心的相关设备，完成测量爆轰波在点燃、稳定、熄灭的压力变化情况，并通过改变 TT' 位置，测得了压力在主燃烧室的变化情况。

3. 实验过程

3.1. 实验设备

图 3 是实验设备布置图，图中黑色粗实线是气流管道，气源通过气流管道分别给环形燃烧室和预爆轰管供给燃料和氧化剂。进入主燃烧室和预爆轰管气体的时间由气流管道上的电磁阀控制，四个电磁阀的开闭及预爆轰管的点火均由控制系统的单片机实现。气流管道上的单向阀可以避免高温高压的气体回流起

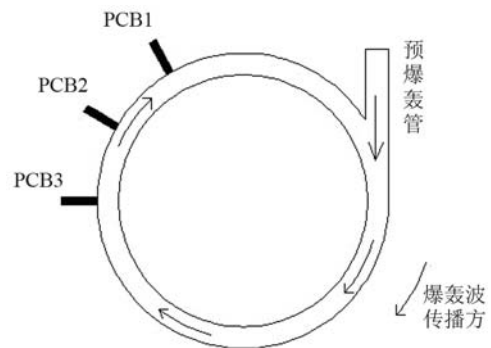


Figure 4. Distribution of pressure sensor
图 4. 传感器布置图

到保护的作用。预爆轰管的顶端放置火花塞，当预爆轰管充满可燃气时，预爆轰管点火，经过爆燃转爆轰的过程，一个定向的爆轰波就会沿切向进入主燃烧室并利用主燃烧室内的可燃气形成环向传播的爆轰波。

当主燃烧室内的爆轰波被起爆时时，测量系统就会启动数据记录系统记录燃烧室内壁感受到的压力，传感器布置如图 4 所示。传感器沿着燃烧室的环向布置，间隔一定的距离，同时在轴向也有传感器的接口，这样就可以通过布置在内壁上的传感器，测量到主燃烧室内的压强分布。当爆轰波传播时，不同的传感器测得的信号在时间上是有差异的。就可以通过这样的时间差计算爆轰波的速度。同时沿着轴向的传感器可以测出不同位置的压强不同，这样就可以测量到主燃烧室内的压强分布。

测量系统的重要器件是放置在主燃烧室上的 PCB 传感器。传感器将感受到的压力变化信号转换成电荷信号，通过放大器放大处理后，数据记录系统将信号存入计算机。通过压力与电荷、电荷与电压的关系，就可以将电压与压力建立确定关系。

主燃烧室是通过一段长管道和卸爆罐相连接的。卸爆罐是一个体积为 1.36 m^3 的密闭空间，使用卸爆罐是基于安全考虑，因为爆轰的产物有高温高压的特点，不能直接排放到实验室内，卸爆罐就起到给产物平稳降温降压的作用。同时，由于爆轰伴随着巨大的轰鸣声，卸爆罐可以降低噪声，同时使用卸爆罐可以调节管道出口背压，从而为旋转爆轰波的稳定传播创造条件。

3.2. 实验步骤

实验开始前，首先打开抽气系统，将卸爆罐的气压稳定在 0.2 个大气压。打开气源阀门并调节到合适的气源压力。打开测量系统，传感器开始工作。

通过设置控制系统参数，启动气流管道上的电磁阀，氧气和氢气进入主燃烧室和预爆轰管。达到一定的量之后，火花塞启动点燃预爆轰管内混合气体。经过预爆轰管的爆燃转爆轰过程，在预爆轰管的末端已经衍化成爆轰波并冲入主燃烧室，预爆轰管的爆轰波引燃主燃烧室内的混合气体。主燃烧室是一个环形的圆腔，初始爆轰波将环腔内可燃物全部燃尽的同时，在主燃烧室头部形成一个由新充入可燃混合气体三角区域。爆轰波的波头沿着圆周方向，在燃烧室头部向未燃烧混合气体方向传播。爆轰波扫过 PCB 压力传感器所在的位置时，传感器就会感受到一个压力的升高；爆轰波扫过之后，传感器会记录压力的降低。这样通过传感器记录的压力变化，结合主燃烧室的尺寸，就可以计算出爆轰波的速度和爆轰波处的压力。

3.3. 实验数据及结果分析

3.3.1. 主燃烧室压力变化图

图 5 是传感器记录到的主燃烧室内压力变化图

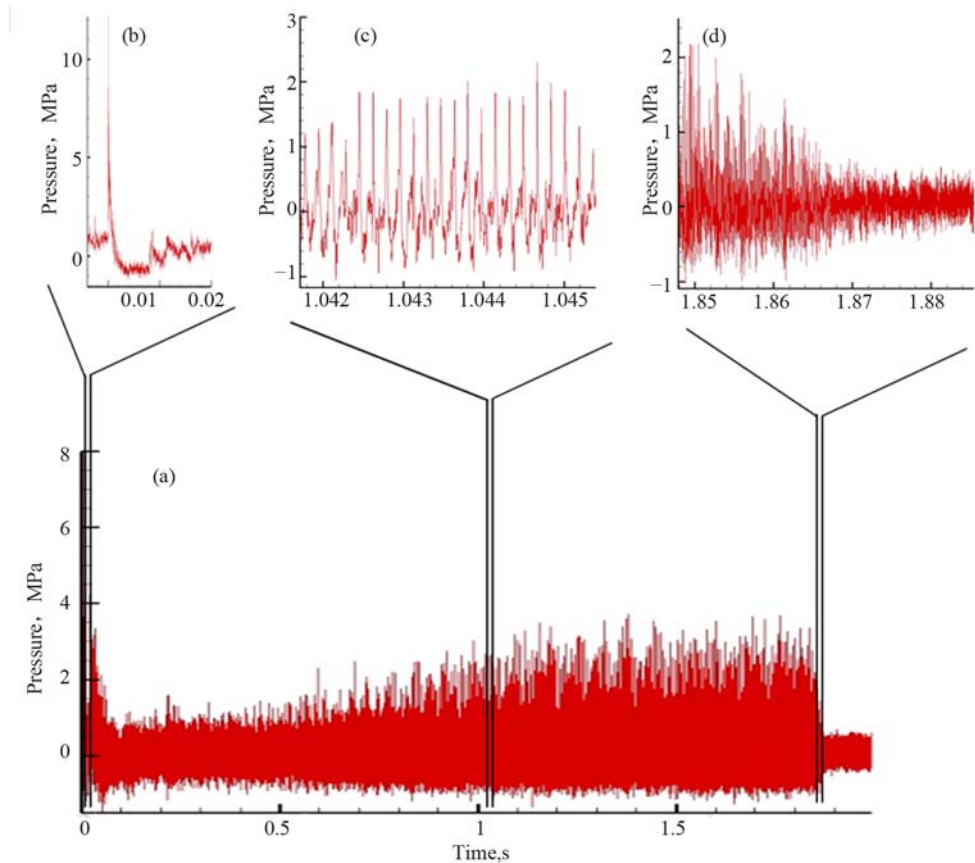


Figure 5. Diagram of pressure signal
图 5. 传感器记录的压力信号图

像。从(a)中可以看出：在 5 ms~1.85 s 的时间内，传感器均记录到压力信号，1.85 s 后，电磁阀切断气流管道，爆轰燃烧结束。

将记录的信号起始部分放大处理，可以得到图 5(b)中所示，一个尖峰过后，压力减少并且趋于平稳，没有出现爆轰特有的等间隔尖峰。这是由于火花塞点火起爆后，爆轰波冲入充满可燃气体的主燃烧室。在冲入点附近，沿着环腔两个方向均有爆轰波传播。这两个爆轰波在传播过程中会发生碰撞相互削弱导致主燃烧室内的压力值并不会很快地稳定下来，形成一段爆轰前的自组织阶段，在这段时间内，主燃烧室内的燃烧是不稳定的，各个方向的爆轰都在进行，但是有一个比较强的爆轰定向传播并会随着时间的推移持续地增大，这也是压力传感器记录到周期信号但是信号强度不强的原因。

随着爆轰的持续进行，自组织的混乱爆轰会逐渐的形成一个大的主爆轰波。一旦这个爆轰波占据绝对的优势，那么这个爆轰波就会持续地沿着环腔旋转传播，压力传感器就会记录到周期性的压力信号，如图 5(c)所示。Wolanski^[17]曾在甲烷与氧气混合连续爆轰实验中发现了相似的现象，并对这段爆轰的自组织过程进行了论证，北京大学刘勖^[18]在数值计算中也发现了相似的现象并进行了深入的分析。

爆轰持续一段时间后，控制系统切断电磁阀进入主燃烧室内的气流，爆轰由于没有后续的可燃气体而逐渐熄灭。图 5(d)即记录的爆轰熄灭过程中压力变化情况。可以看到爆轰压力逐渐降低并维持在一个稳定的水平。

3.3.2. 爆轰的自调节

将稳定部分压力信号进行进一步分析，会发现有一部分的压力信号有一个稳定的震荡周期，如图 6 所示。

可以看出，除了一个爆轰波周期的尖峰，还有个比较稳定的峰值增大与减小的过程。这个增大与减小的过程构成了爆轰波在主燃烧室内传播时的自我调节过程。爆轰波沿着主燃烧室环腔传播时，可燃气体沿着轴向传入燃烧室。爆轰波前的新鲜可燃气体的量与爆轰波的宽度是有关的：当爆轰波的宽度比较大时，爆轰波的压力就比较高，由此会导致主燃烧室内的可燃气体进入量减少，可以维持爆轰的气体就减

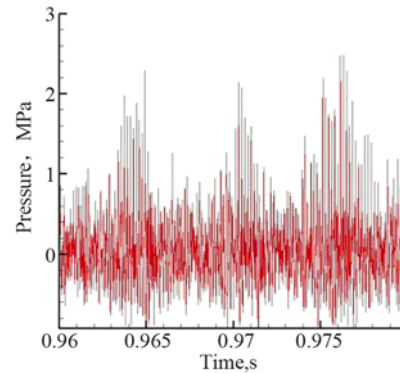


Figure 6. Self-regulation of detonation
图 6. 爆轰的自我调节

少；爆轰波的宽度减小，压力会逐步地降低，主燃烧室内进入的可燃气体的量就会增多；爆轰波前的可燃气体增多，会激发另一个压力增加的过程。这样一个压力的增加与减少的过程是爆轰波在传播过程中的自我调节现象，当一个合适的压力值与进气量相匹配时，压力就会稳定在一个稳定的范围内。

3.3.3. 爆轰波速度的计算

在爆轰稳定部分取一段若干个周期，计算爆轰传播一周所用的时间，如图 7 所示。图中所示范围内有 33 个周期，总时间为：

$$t = 4550 \mu\text{s}$$

每个周期平均时间为：

$$T = t/33 = 137.8 \mu\text{s}$$

主燃烧室直径为：

$$d = 8 \text{ cm}$$

计算可以得到爆轰的速度 V 为：

$$V = \pi \times d/t = 1822.9 \text{ m/s}$$

这与以当量比混合的氢氧爆轰的理论 C-J 速度

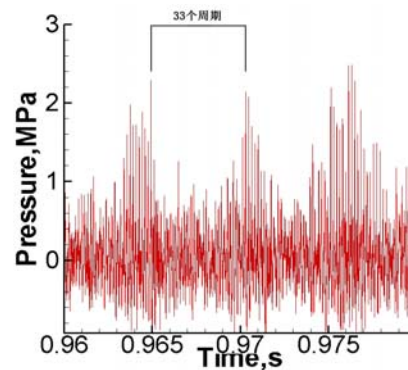


Figure 7. Detonation period
图 7. 爆轰波周期计算

2800 米/秒的数量级吻合的非常好, 证明主燃烧室内已经形成了连续传播的爆轰波, 其数值的差异主要是实验时氢氧爆轰不符合理论当量比。

4. 结论

本文使用北京大学燃烧推进中心连续旋转爆轰发动机实验设备, 探讨了爆轰实验中主燃烧室内爆轰波随时间的变化规律, 得出以下相关结论。

1) 获得了稳定传播 1.85 秒的氢氧连续旋转爆轰。

2) 连续爆轰在主燃烧室内刚开始燃烧时有一段压力的低压区。这个时间段燃烧室内并没有形成稳定持续的连续爆轰, 而稳定阶段, 一个占绝对优势的爆轰波持续周期稳定的在主燃室内传播。

3) 爆轰波在主燃烧室内传播时有自调节机制, 除了稳定的周期信号外, 压力值会有一个增大减小再增大的趋势, 直到爆轰波宽度和进气量形成一个匹配的数值。

参考文献 (References)

[1] 姜宗林. 爆轰推进概念与机理研究 - 新型发动机研究的热点[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 23(4): 25-26.
 [2] 张宝佺, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001, 8: 88-89.
 [3] D. L. Chapman. On the rate of explosions in gases. Philosophical Magazine, 1899, 47(284): 90-104.
 [4] E. Jouguet. Macamique des Explosifs, Paris: Octave Doin et fils. 1917.
 [5] Y. B. Zel'dovich. On the theory of the propagation of detonation

in gaseous system. Journal of Experimental and Theoretical Physics, USSR, 10: 524.
 [6] N. Hoffman. Reaction-propulsion produced by intermittent detonation combustion. ministry application. AIAA 2000-3473, 2000.
 [7] F. K. Lu. Prospects for detonations in propulsion. proceedings of the 9th international symposium on experimental and computational aerothermodynamics of internal flows (ISAIF9). Paper No. IL-2, 2009.
 [8] 严传俊, 范玮. 脉冲爆轰发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
 [9] 邵业涛, 王建平. 连续爆轰发动机的二维数值模拟研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 980-987.
 [10] B. V. Voitsekhevskii. Stationary spin detonation. Soviet Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1959, 129(6): 157-164.
 [11] F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan and E. F. Vedernikov. Continuous spin detonations. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(6): 1204-1216.
 [12] J. Kindracki, P. Wolanski, Z. Gut. (2011). Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels-oxygen mixtures. Shock Waves. 21:75-84.
 [13] J. P. Wang, T. Y. Shi, Y. H. Wang, Y. S. Liu and Y. S. Li. Experimental research on continuous detonation engine. 23rd ICDERS, Irvine, 2011.
 [14] Y. T. Shao, J. P. Wang. Change in continuous detonation wave propagation mode from rotating detonation to standing detonation. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3): 034705.
 [15] R. Zhou, J.-P. Wang. Numerical investigation of flow particle paths and thermodynamic performance of continuously rotating detonation engines. Combustion and Flame, 2012, 159: 3632-3645.
 [16] 王健平, 石天一, 王宇辉, 刘宇思. 连续爆轰发动机的实验研究[R]. 第十四届全国激波与激波管学术会议, 黄山, 2010: 181-184.
 [17] J. Kindracki, P. Wolanski and Z. Gut. Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels-oxygen mixtures. Shock Waves, 2011, 21: 75-84.
 [18] M. Liu, J. P. Wang. Three dimensional simulation for the effects of fuel injection patterns in rotating detonation engine. 23rd ICDERS, Irvine, 2011.