

## 封闭空间中火焰-冲击波相互作用及缸内压力波动现象分析

高东志<sup>1</sup>, 卫海桥<sup>1</sup>, 周磊<sup>1</sup>, 刘丽娜<sup>2</sup>, 赵健福<sup>1</sup>, 徐在龙<sup>1</sup>

(1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津内燃机研究所, 天津 300072)

**摘要:** 研究了在自主设计的带孔板新型的定容燃烧弹中, 采用氢气-空气作为燃料, 得到不同强度的加速火焰和冲击波, 证明了湍流火焰和冲击波的相互作用。利用高速纹影技术捕捉经过孔板之后产生的湍流火焰前锋和超声速传播的冲击波。分析孔径、孔隙率对火焰传播速度、冲击波强度以及缸内压力波动强度的影响规律。发现在一定的初始条件下, 层流火焰经过孔板加速会产生清晰的冲击波, 反射冲击波与火焰相互作用, 会使得火焰发生往复传播。此时的缸内压力也会出现较大幅度的波动。这种火焰与冲击波的相互作用机理被认为是导致缸内压力大幅波动的原因。该研究为小型强化汽油机爆震现象的研究提供借鉴, 也为 DDT 和脉冲爆轰现象的研究提供了一种新方法。

**关键词:** 冲击波; 湍流加速; 相互作用; 压力波动;

**中图分类号:** TK417 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0239004

## Experimental study of flame-shock wave interaction and cylinder pressure oscillation in confined space

Gao Dongzhi<sup>1</sup>, Wei Haiqiao<sup>1</sup>, Zhou Lei<sup>1</sup>, Liu Lina<sup>2</sup>, Zhao Jianfu<sup>1</sup>, Xu Zailong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Experiments were conducted in a newly designed constant volume combustion bomb with orifice plate by varying initial conditions. Hydrogen-air mixtures were used to obtain the turbulent flame front and shock wave, as well as the processes of flame-shock interactions were tracked by high-speed schlieren photography. The effects of apertures, porosities, equivalence ratios and distance between spark and orifice plate on the flame propagation speed, the intensity of shock wave and their interactions to pressure oscillation were analyzed in detail. It was found that there formed a clear shock wave after laminar flame passing through orifice plate under certain conditions. The reflected shock wave interacted with the flame front, which causes oscillating flame propagation. On the other hand, the cylinder pressure presents a violent fluctuation. It was indicated that the interaction between flame and shock wave was the reason of pressure oscillation. This work provides a reference for the study of knock in SI engines and shows a method for DDT and pulse detonation phenomena research as well.

**Key words:** shock wave; turbulent flame acceleration; interaction; pressure oscillation

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51476114, 51606133)

作者简介: 高东志(1988-), 男, 博士生, 主要从事火焰传播、自燃、爆震方面的研究。Email: gaodongzhi@tju.edu.cn

通信作者: 周磊(1982-), 男, 副教授, 主要从事湍流燃烧实验及数值模拟方面的研究。Email: lei.zhou@tju.edu.cn

## 0 引言

能源危机和环境污染促使制造商生产高热效率和低排放的发动机以满足日益严格的排放法规<sup>[1]</sup>。在这个背景下,许多节能减排的技术被提出,其中采用增压技术使得发动机小型化是最有潜力的技术之一。爆震是限制汽油机小型化的主要障碍。并且爆震产生的机理尚不明确。目前有两种理论来解释爆震现象:末端气体自燃理论和爆轰理论<sup>[2]</sup>。普遍认为爆震起源于湍流火焰锋面之前末端气体自燃导致的急速热释放,产生局部高压所致。局部压力不均匀产生的压力波或者冲击波在燃烧室中的往复传播,导致了燃烧室内的压力震荡。本质上,发动机爆震总是伴随有火焰和冲击波的相互作用和快速的化学能量的释放<sup>[3-5]</sup>。因此研究封闭空间中火焰-冲击波的相互作用非常重要,并且这是揭示现代火花点火发动机爆震或超级爆震机理的关键。

随着现代试验技术的发展,采用光学诊断的手段测量火焰加速、火焰-冲击波相互作用的研究取得了重大进展。一些学者在安装障碍物的方形截面管道中进行了大量的研究<sup>[6-10]</sup>。多数研究集中在火焰加速现象的研究,认为火焰-冲击波的相互作用是一种加速火焰能量的释放并形成爆轰燃烧的有效方法,研究表明冲击波对火焰的加速起到了重要的作用。肖华华等<sup>[11]</sup>在封闭管道中试验研究了郁金香火焰特性。他们得出结论压力波导致火焰周期性的减速并且火焰传播速度波动与压力增长率是一致的。但是他们并没有获得火焰与压力波或冲击波作用的直接照片。

发动机爆震和超级爆震总是与火焰和冲击波的相互作用相关并且伴随快速的化学能量的释放。对于高碳氢含量的燃料,例如汽油的火焰传播速度较慢,即使通过孔板的加速作用也很难形成冲击波。因此笔者选择了氢气-空气的混合气作为测试燃料,因为其高的火焰传播速度,并在火焰锋面之前能够形成清晰的冲击波,可以用来研究火焰-冲击波的相互作用现象。该工作的目的是研究冲击波-火焰相互作用的机理及其影响缸内压力波动的规律。因此文中使用带孔板的定容燃烧装置以产生湍流加速火

焰。通过控制孔径、孔隙率得到不同的湍流火焰和冲击波传播速度。由高速纹影成像拍摄得到火焰-冲击波相互作用过程。该研究详细的分析了火焰加速的过程,各初始条件对湍流火焰传播速度和冲击波强度的影响规律,以及冲击波对缸内压力波动的影响过程。

## 1 试验装置及研究方法

该试验是在定容燃烧弹试验台架上进行的,如图 1 所示。台架包括七部分:定容燃烧弹本体、点火系统、喷油系统、温度控制系统、进排气系统、高速纹影系统和数据采集系统。详细的系统图请参见参考文献 [12-13]。定容燃烧弹的燃烧室为圆柱形的腔体,长度为 230 mm,直径为 100 mm,燃烧室的容积为 2.32 L,弹体承受最高压力为 10 MPa。在燃烧室的左端前后壁面上分别安装直径为 80 mm 的石英玻璃窗口。Kistler 6113B 型缸压传感器安装在窗口的正上方。缸压采集频率为 100 000 Hz,高速摄像机的拍摄速度为 160 000 帧/s。定容燃烧弹上下壁面分别安装有 1 000 W 的加热板,使整个弹体加热到 373 K,防止氢气燃烧后冷凝成液滴。

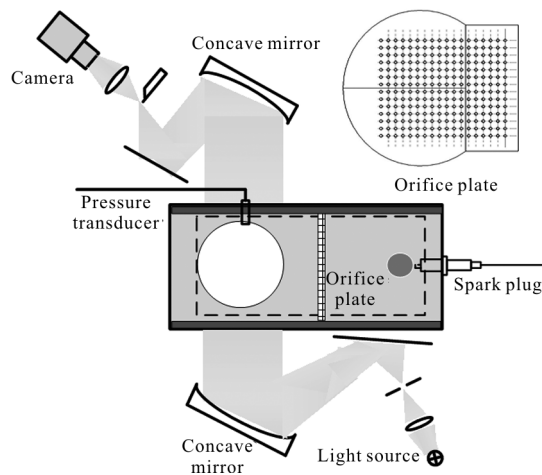


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

## 2 试验结果和分析

### 2.1 孔径对火焰、冲击波传播速度及缸内压力波动的影响

图 2 表示的是孔隙率 12%, 初始压力 2 bar, (1 bar=10<sup>5</sup> Pa)不同孔径孔板对应的燃烧室末端火焰

及冲击波发展系列图片。需要指出的是,每种孔径工况下,火焰发展对应单独的时间序列,各工况之间没有可比性;每张图片的右边界即是燃烧室的末端壁面。在 2~5 mm 工况下,可以清晰地看到在火焰前锋之前形成冲击波,到达壁面之后,形成反射冲击波。而孔径为 6 mm 时,结合图 2 可知,此时产生的射流作用最弱,火焰之前没有形成冲击波,但是经过壁面反射之后,在 4.74 ms 时,形成可见的反射冲击波。以孔径 2mm 的系列图片举例分析,4.58ms 时冲击波与壁面发生反射,产生反射冲击波,反射冲击波与火焰相对传播,4.64 ms 时,反射冲击波与火焰相互作用,使得火焰发生减速传播,甚至后退的过程。当冲击波经过火焰,并由火花塞侧的壁面反射之后,使得冲击波与火焰传播方向相同,再与火焰前锋相互作用之后,会推动火焰的传播。这就导致燃烧室末端的火焰,受到冲击波的来回作用,产生周期性的加速减速传播。这就是封闭空间中冲击波与火焰的相互作用机理。

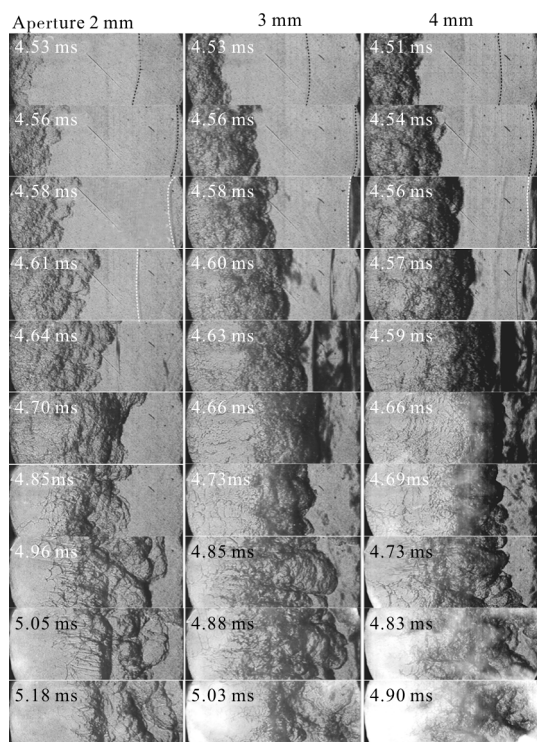


图 2 不同孔径条件下燃烧室末端火焰及冲击波发展的系列图片  
Fig.2 Flame and shock wave propagation images in the end of the chamber at different hole sizes

图 3 表示的是孔隙率 12%, 初始压力 2 bar, 不同孔径孔板对应的燃烧室末端火焰传播速度变化曲线

线。其中,实验观测的是距离燃烧室末端 78 mm 的范围,78 mm 位置处代表的是燃烧室末端的壁面,对应图 2 中的实验照片。从图中可以看出,随着孔径的增大,对应的曲线位置在上方,表明火焰传播速度越大。刚进入观测范围,即 0 mm 时,孔径越大,此时的火焰传播速度越大,4mm 孔板对应的火焰传播速度达到 275 m/s,2mm 孔板对应火焰传播速度仅有 75 m/s。在 0~30 mm 范围内,火焰传播速度增加。结合图 2 可知,40 mm 之后,反射冲击波开始与火焰相互作用,可以看出各工况下,火焰传播速度迅速下降,趋近于 0,甚至反向传播。

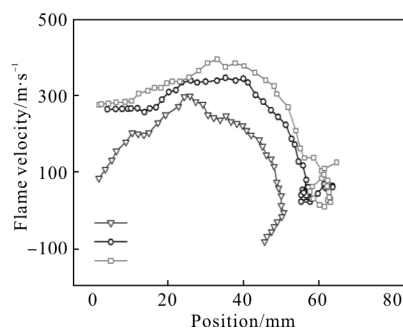
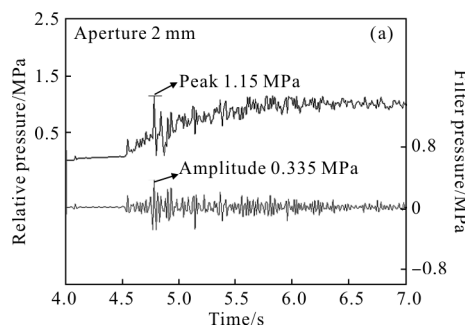


图 3 不同孔径孔板对应的燃烧室末端速度变化曲线  
Fig.3 Flame velocity in the end of the chamber at different hole sizes

图 4 表示的是孔隙率 12%, 初始压力 2 bar, 不同孔径孔板对应缸内燃烧压力曲线。需要注意的是,本实验使用的是 Kistler 6113 B 型缸压传感器,其平齐安装在距离燃烧室末端 30 mm 处的正上方。图中绿线表示的是原始的缸压曲线,红线表示的是采用 20 kHz 高通滤波后的缸压曲线,用来反映缸内压力波动的大小。从图中可以看出,随着孔径的增加缸内压力波动的峰值是增加的;3 种孔径工况下,缸内压力均有不同程度的波动,4 mm 孔径的条件下产生的压力波动的振幅是最大的,达到 0.8 MPa,且随着孔径的增加,缸内压力波动的振幅增加。



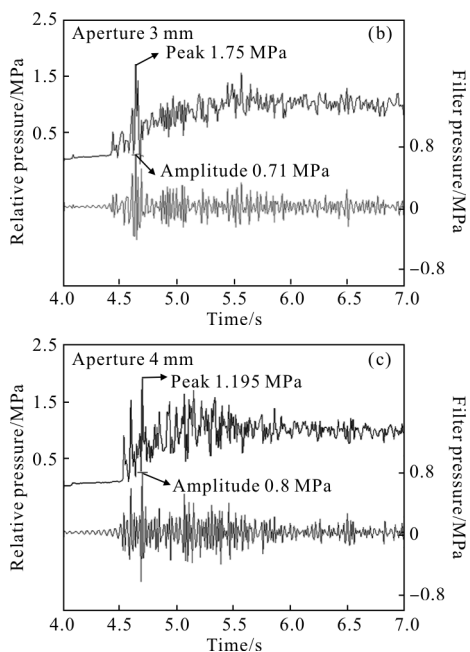


图 4 不同孔径孔板对应缸内燃烧压力曲线

Fig.4 History of cylinder pressure at different hole sizes

图 5 所示为孔隙率 12%，初始压力 2 bar，不同孔径孔板对应的燃烧室末端冲击波传播速度曲线。其中正值代表的是正向传播的冲击波，负值表示的是经过壁面反射之后逆向传播的冲击波，即反射冲击波。从图中可以看出，孔径为 3 mm 时，最早产生冲击波，在 20 mm 位置处就观测到清晰的冲击波，其次是 5 mm 孔径对应的 33 mm 处产生冲击波。并且这两种工况下产生的冲击波的速度接近，产生初期速度值达到 600 m/s，随着向燃烧室末端传播，速度略微下降。而当孔径 2 mm 时，产生的冲击波速度较小，大约为 500 m/s。总之，正向传播的冲击波，其速度值介于 500~600 m/s 之间，受孔径的影响是不大的。需要指出的是当大孔径 6 mm 的时候，没有产

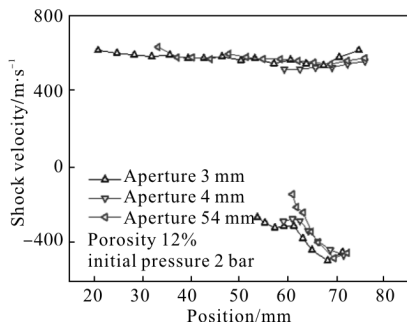


图 5 不同孔径孔板对应的燃烧室末端冲击波传播速度

Fig.5 Shock velocity in the end of the chamber at different hole sizes

生可见的正向传播的冲击波。78 mm 处是文中实验燃烧室末端壁面所在的位置，可以看出经壁面之后，各种工况下反射冲击波速度大小是接近的，为 450 m/s 左右。随着反射冲击波的逆向传播，各工况之间表现出差异性，孔径越大，反射冲击波速度衰减的越快，即表现为曲线的斜率越大。

## 2.2 孔隙率对火焰、冲击波传播速度及缸内压力波动的影响

图 6 表示的是孔径 3 mm，初始压力 3 bar，不同孔隙率条件下燃烧室末端的火焰发展照片。比较第一行时间可以看出，随着孔隙率的增加，火焰锋面进入燃烧室末端观测区域越晚。即小孔隙率的条件下，火焰穿过孔板产生的湍流火焰传播速度更快。孔隙率 12% 时，在火焰锋面之前可以观测到清晰的冲击波。

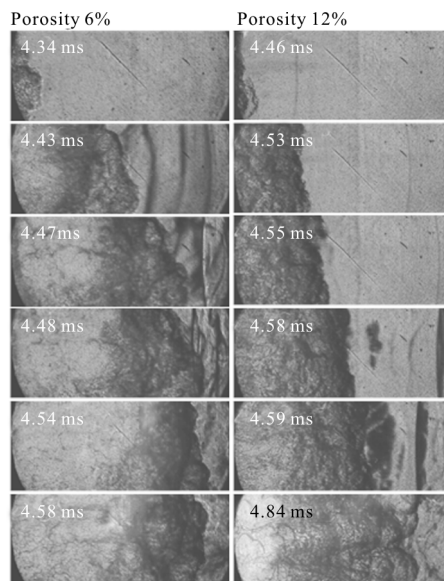


图 6 不同孔隙率条件下燃烧室末端火焰及冲击波发展的系列图片

Fig.6 Flame and shock wave propagation images in the end of the chamber at different porosities

图 7 表示的是孔径 3 mm，初始压力 3 bar，不同孔隙率条件下燃烧室末端火焰锋面的位置随时间的变化。从图中可以看出，孔隙率越小，火焰锋面最先进入观测窗口。在观测窗口的初期，火焰锋面的位置随时间是线性变化的，后期受到压力波或者冲击波的作用会发生往复传播，孔隙率越大时，开始发生往复传播的位置越靠前，产生往复传播的次数也越多。在孔隙率 12% 的时候，可以看出曲线的波动较大，即

产生往复传播的现象最明显,这与图 6 中产生清晰的冲击波的现象是一致的。

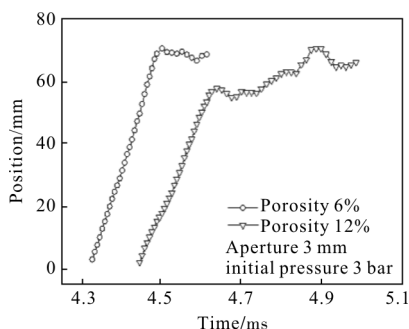


图 7 不同孔隙率条件下燃烧室末端火焰锋面的位置随时间的变化曲线

Fig.7 Flame front position verses time in the end region of the chamber at different porosities

图 8 表示的是孔径 3 mm,初始压力 3 bar,不同孔隙率条件下燃烧室末端火焰传播速度随位置的变化曲线。可以看出孔隙率越小,火焰传播速度越大。但是速度开始下降的位置是随着孔隙率的减小而增加的,即大孔隙率的条件下,受到压力波或冲击波作用的往复传播现象越早。这与图 7 中的表现是一致的。

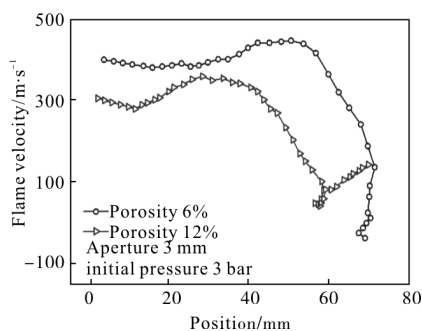


图 8 不同孔隙率条件下对应的燃烧室末端速度变化曲线

Fig.8 Flame velocity in the end of the chamber at different porosities

图 9 表示的是孔径 3 mm,初始压力 3 bar,不同孔隙率条件下缸内燃烧压力曲线。其中黑色实线表示的是由缸压传感器经电荷放大器直接采集到的缸压;灰线表示 20 kHz 高通滤波之后的缸压。从图中可以看出随着孔隙率的增加,缸内燃烧压力的峰值逐渐下降,压力波动的振幅逐渐减小,并且压力波动出现的时刻也变晚。结合图 8 可知,孔隙率越小,燃烧室末端火焰传播速度越大,此时对应的缸内压力

峰值以及振幅也越高。

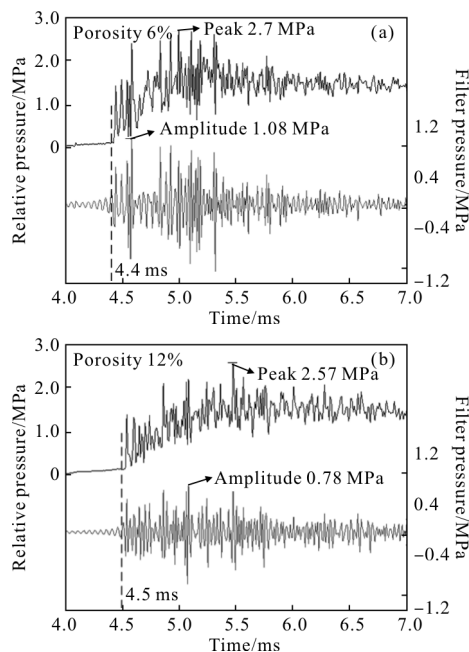


图 9 不同孔隙率条件下对应的缸内燃烧压力曲线

Fig.9 History of cylinder pressure at different porosities

图 10 表示的是孔径 3 mm,初始压力 3 bar,不同孔隙率条件下燃烧室末端的冲击波传播速度。对应图 6 中的火焰传播照片可知,大孔隙率(18%,24%)的条件下,没有产生可见的冲击波。当孔隙率 12% 时,较早产生可见冲击波,大约在 10 mm 位置,其速度为 600 m/s 较孔隙率 6% 对应的冲击波速度略高。而反射冲击波也有相似的趋势,12% 孔板产生的反射冲击波较 6% 的略大。

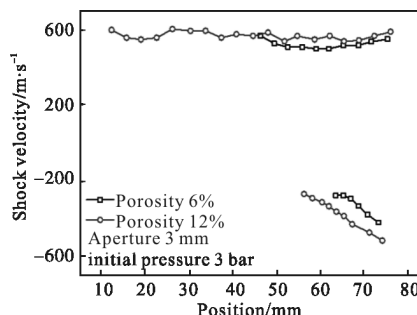


图 10 不同孔隙率条件下燃烧室末端的冲击波传播速度

Fig.10 Shock velocity in the end of the chamber at different porosities

### 3 结论

(1) 该实验证明,在封闭燃烧室中,通过加装孔板,在火焰锋面之前可以产生清晰的冲击波。

(2) 随着孔径的增加,燃烧室末端的湍流火焰速度越大,缸内压力峰值最大,缸内压力波动的振幅也最大。

(3) 随着孔隙率的增加,燃烧室末端湍流火焰传播速度减小,冲击波减弱,缸内压力峰值减小,振幅也减小。

(4) 当燃烧室末端产生冲击波时,冲击波与火焰相互作用会导致火焰锋面发生往复传播,并伴有较高的压力震荡幅值。

参考文献:

- [1] Rudloff J, Zaccardi J M, Richard S, et al. Analysis of pre-ignition in highly charged SI: emphasis on the auto-ignition mode[J]. *Proc Combust Inst*, 2013, 34: 2959-2967.
- [2] Heywood J B. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-hill College[M]. US: New York University, 1988: 457-458.
- [3] Pan J, Shu G, Wei H. Interaction of flame propagation and pressure waves during knocking combustion in spark-ignition engines [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 186: 192-209.
- [4] Kawahara N, Tomita E, Sakata Y. Auto-ignited kernels during knocking combustion in a spark-ignition engine[J]. *Proceedings Combustion Institute*, 2007, 31: 2999-3006.
- [5] Dahnz C, Spicher U. Irregular combustion in supercharged spark ignition engines-pre-ignition and other phenomena[J]. *International Journal of Engine Research*, 2010, 11: 485-498.
- [6] Bychkov V, Valiev D, Eriksson L E. Physical mechanism of ultrafast flame acceleration [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101 : 164501.
- [7] Ciccarelli G, Johansen C T, Parravani M. The role of shock-flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel[J]. *Combust Flame*, 2010, 157: 2125-2136.
- [8] Pinos T, Ciccarelli G. Combustion wave propagation through a bank of cross-flow cylinders [J]. *Combust Flame*, 2015, 162: 3254-3262.
- [9] Liberman M A, Ivanov M F, Kiverin A D, et al. Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures [J]. *Acta Astronaut*, 2010, 67: 688-701.
- [10] Liberman M A, Kuznetsov M, Ivanov A, et al. Formation of the preheated zone ahead of a propagating flame and the mechanism underlying the deflagration-to-detonation transition[J]. *Phys Lett*, 2009, 373: 501-510.
- [11] Xiao H, Wang Q, Shen X, et al. An experimental study of distorted tulip flame formation in a closed duct[J]. *Combust Flame*, 2013, 160: 1725-1728.
- [12] Wei H, Gao D, Zhou L, et al. Experimental observations of turbulent flame propagation effected by flame acceleration in the end gas of closed combustion chamber [J]. *Fuel*, 2016, 180: 157-163.
- [13] Wei H, Gao G, Zhou L, et al. Experimental analysis on spray development of 2-methylfuran-gasoline blends using multi-hole DI injector[J]. *Fuel*, 2016, 164: 245-253.