

文章编号: 1000-8055(2006)04-0637-5

供油时间改变对脉冲爆震发动机工作特性的影响

张义宁, 王家骅, 范育新, 李建中, 张靖周
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了提高脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, 简称 PDE)工作的协调性。试验获得汽油/空气混气点火延迟时间约为 3.6 ms, 缓燃向爆震转变(Deflagration to Detonation transition, 简称 DDT)过程所需时间约 3.8 ms。对 PDE 一个工作周期进行合理的时间分配, 采用电磁阀控制停止供油时间, 动态压力传感器测量爆震波压力, 研究 PDE 在一定的工作周期内的工作性能, 发现对于小管径的, 两相混气 PDE 可以不用隔离段; 在亚音燃烧时段继续供油, PDE 仍可以正常工作; 在 PDE 膨胀时间段供油会使爆震波的压力峰值下降。研究的结果对提高 PDE 的工作频率及更好的组织两相爆震燃烧有一定的参考价值。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 爆轰; 两态混气; 隔离段

中图分类号: 235 22

文献标识码: A

Investigation on the working characteristics of pulse detonation engine with changing the time of fuel injection

ZHANG Yi ning, WANG Jia hua, FAN Yu xin,
LI Jian zhong, ZHANG Jing zhou

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The investigation is aimed at the improvement of the coordination of operation for the two-phase pulse detonation engine. The time delay of ignition obtained in gasoline/air mixture by experiments was about 3.6ms. The time period of DDT process was about 3.8 ms. By sharing the total cycle time aptly and changing the time of fuel injection, the operation characteristics of PDE were researched by experiments. It was found that the period of the air purge can be eliminated in the operation of the two-phase PDE. Keeping the time of fuel injecting in the period of DDT process, the PDE prototype can operate steadily and cyclically. The time of fuel injection delays to the time period of the expansion process, the peak value of detonation pressure will be decreased. These conclusions are valuable for reference to increase operating frequency of PDE and promote the efficiency of two-phase detonation.

Key words: aerospace propulsion system; aerospace propulsion; pulse detonation engine; detonation; two-phase mixture; air purge

脉冲爆震发动机作为新概念发动机^[1-3], 其工作方式是间歇的, 产生的推力也是脉动的。有关文献^[4]根据 PDE 的工作过程对 PDE 的工作周期

进行定性的时间划分, 目前对于气态混合物的爆震研究较多^[5]。在气态燃料的 PDE 研究中, 隔离断的作用显得尤为重要。隔离段可以保证 PDE

收稿日期: 2005-07-22; 修订日期: 2006-03-22

基金项目: 国防基础预研项目(K1600060704)

作者简介: 张义宁(1977-), 男, 江苏连云港人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事燃烧领域研究。

正常的周期性工作^[6], 新的循环开始即新鲜混气充填之前, 都要充填一定量的不可燃气体, 以隔断上循环高温的燃烧产物与下个循环的新鲜混气接触, 防止混气提前着火而进一步发展为连续燃烧。国内外相关研究中隔离段的控制一般是通过高频电磁阀控制供油来实现^[7]。国内相关研究结果显示两相爆震燃烧可以不要空气隔离段, 采用自适应控制燃料供给^[8]。对于两相爆震有无隔离段将对 PDE 工作性能产生的影响, 没有进行深入研究。

本文试验研究了改变供油时段对两相脉冲爆震燃烧的影响。在自吸气式 PDE 内, 以汽油为燃料, 空气为氧化剂, 试验获得在汽油/空气的两相混气中 PDE 的点火延迟时间, 缓燃向爆震转变过程所需的时间, 以此为根据, 对一个周期内的时间进行合理的分配, 在 PDE 混气充填速度一定的条件下, 试验通过控制停止供油时间来控制隔离段的充填时间, 当充填混气的速度和充填长度一定时, 隔离段的缩短, 可以缩短 PDE 的工作周期, 提高 PDE 的工作频率。工作频率的提高对于 PDE 的研究具有重要的意义, 随着工作频率的提高, PDE 的工作性能会得到相应的提高, 因此有必要通过改变供油时段对两相脉冲爆震燃烧产生的影响进行研究。

1 试验设备、测试仪器、试验件及工况

1.1 试验设备及测试仪器

试验设备及测试仪器如图 1 所示

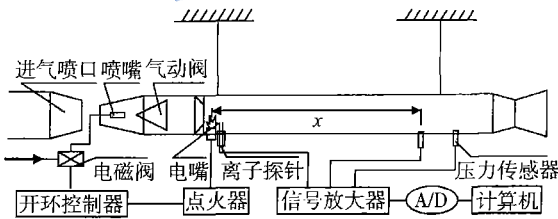


图 1 试验及测试系统

Fig. 1 Experimental Setup & Measure System

PDE 试车架为悬挂式, 进气由一台压头 3 500 mm 水柱, 流量为 9.6 m³/s 罗茨风机提供。供油由油压 6.9 MPa, 流量 200 g/s 左右的汽油泵提供, PDE 内空气流量用皮托管在冷态下测量, 供油量用涡轮流量计测量, PDE 内压力由两个轴向布置的 PCB 压力传感器测量, x 分别为 1.0 m, 1.5 m。

1.2 试验件

PDE 试验件为内径 58 mm 等截面管子, 长度为 1.85 m, 采用锥形气动阀, 离心气动雾化喷嘴供油, 扩张型进气道, 点火采用高能电嘴, 紧靠电嘴附近装有离子探针, PDE 管内装有强化蒸发和强化燃烧装置, 管尾装有收扩型喷管。如图 2 所示。

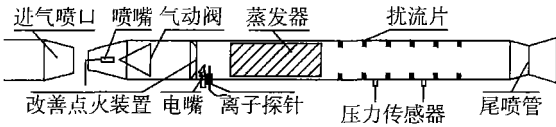


图 2 试验系统试验件

Fig. 2 Schematic of experimental setup

1.3 工况

常温, 常压, 冷态下爆震管内混气充填速度 $U = 25$ m/s 左右, 燃料为汽油, 油气比 $\alpha = 1$, PDE 工作频率设定为 10 Hz。用 t_i 表示隔离段充填时间; t_f 表示混气充填时间; t_{DDT} 表示缓燃向爆震转换的时间; t_D 表示爆震波触发到排出爆震管所需时间; t_R 表示膨胀波向上游传播至推力壁后反射出爆震燃烧室所用时间, u_b 为爆震波传播速度。根据气动阀式 PDE 的试验结果经验公式^[9] $t_D +$

$t_R = \frac{10L_f}{u_b}$, PDE 工作周期^[4] $T = t_f + t_i + t_{DDT} + t_D + t_R = \frac{L_f}{U} + \frac{\Delta L_i}{U} + t_{DDT} + 10 \frac{L_f}{U}$, 供油电磁阀关闭时间 $\Delta t_2 = t_i + t_{DDT} + t_D + t_R$, 由于 t_{DDT} 、 $t_D + t_R$ 对于一定的燃烧装置及一定的工作条件基本为恒定, 所以试验可通过改变 Δt_2 来改变燃油供给时间。

2 试验结果及讨论

2.1 t_{DDT} 的测定及 PDE 周期时间划分

周期 $T = 100$ ms, 爆震管内压力信号与离子传感器导通信号同步测得, 如图 3 所示:

图 3 中, 左图为 PDE 多循环工作测得的压力信号和离子传感器信号。可以看出, 在 PDE 每一次工作循环过程中, 点火器通电后, 都有一个电磁脉冲信号被传感器捕捉到。右图中, 点 1 处的竖线为点火器通电信号, 对应的时刻记为 t_1 ; 点 2 处表示电嘴附近混气着火, 产生大量离子, 离子探针导通, 电压随着着火程度(或离子浓度的增加)而迅速下降, 点 2 对应的 t_2 时刻认为混气经过感应期后着火; 点 3 为管内压力迅速升高, 形成爆震波

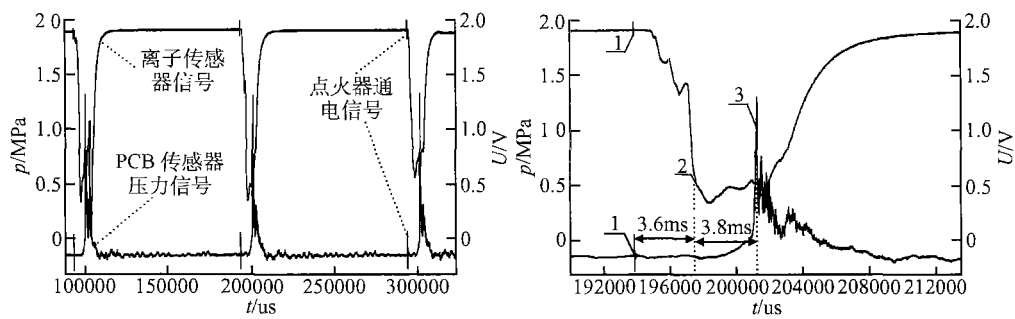


图 3 压力信号和离子信号时序图及其某一波形放大图

Fig. 3 the history time of pressure and ion transducer and wave magnifying

对应的时刻, 记为 t_3 。由多次试验可知混气的着火延迟时间 $t_2 - t_1$, 约为 3.6 ms; 缓燃向爆震转捩, 即 $t_{DDT} = t_3 - t_2$, 约为 3.8 ms。 t_{DDT} 的测定对 PDE 一定周期内的时间分配提供了一定的依据。

根据脉冲爆震燃烧各分过程的时间比例^[10], 在 PDE 正常工作下, 已知爆震管内混气充填速度 $v_f = 25 \text{ m/s}$, 周期 100 ms 可作如下分配: 在最初试验时, 为了避免爆震管内产生连续燃烧, 隔离段长度 ΔL_i 取 0.25 m, 则 $t_i = \frac{\Delta L_i}{v_f} = \frac{0.25}{25} \times 1\,000 = 10 \text{ ms}$; 由离子探针试验可知, 试验测得 t_{DDT} 大约为 3.8 ms; 混气充填长度 $L_f = 1.85 \text{ m}$ 所需时间为 $t_f = \frac{L_f}{v_f} = \frac{1.85}{25} \times 1\,000 = 74 \text{ ms}$; $t_D + t_R = \frac{10L_f}{v_j} = \frac{10 \times 1.85}{1\,400} \times 1\,000 = 13.2 \text{ ms}$, v_j 为汽油和空气的混气爆震波传播速度, 由于汽油与 JP-10 化学性质相近, 取 $v_j = 1\,400 \text{ m/s}$ ^[11]。由此, 周期 100 ms 得到了合理的分配, $\Delta \tau_c$ 的改变实际上间接的改变隔离段的充填时间以及供油的持续时间: $\Delta \tau_c = 30 \text{ ms}$ 时, 相当于有 250 mm 的纯空气隔离段; $\Delta \tau_c = 25 \text{ ms}$ 时, 隔离段剩下一半, 混气充填加长; $\Delta \tau_c = 20 \text{ ms}$ 时, 空气隔离段消失; $\Delta \tau_c = 15 \text{ ms}$ 时, 混气着火感应期和亚音燃烧时间在供油; $\Delta \tau_c \leq 10 \text{ ms}$ 时, 供油延续至超燃及膨胀时间。

2. 2 $\Delta \tau_c$ 的改变, 测得爆震管内的压力变化

$f = 10 \text{ Hz}$, $\Delta \tau_c = 30, 25, 20, 15, 10, 5 \text{ ms}$ 爆震管内压力波形如图 4~ 图 9 所示:

用 $\bar{p}$ 表示 1.5 m 处平均压力波峰值。由传感器之间的距离和测得同一个压力波峰的时间差, 可以求得激波平均传播速度 $\bar{v}$, 多次测量的统计数据见表 1。

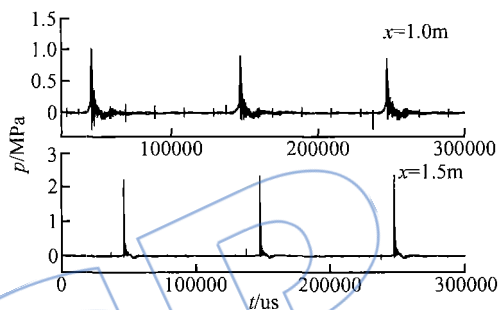


图 4 $\Delta \tau_c = 30 \text{ ms}$ 爆震管内压力时序图

Fig. 4 The history of pressure at $\Delta \tau_c = 30 \text{ ms}$

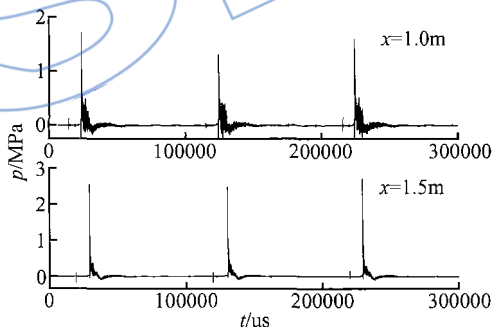


图 5 $\Delta \tau_c = 25 \text{ ms}$ 爆震管内压力时序图

Fig. 5 The history of pressure at $\Delta \tau_c = 25 \text{ ms}$

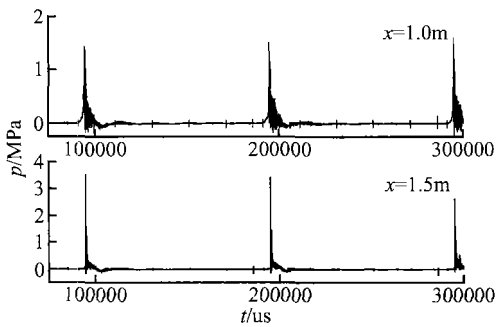


图 6 $\Delta \tau_c = 20 \text{ ms}$ 爆震管内压力时序图

Fig. 6 The history of pressure at $\Delta \tau_c = 20 \text{ ms}$

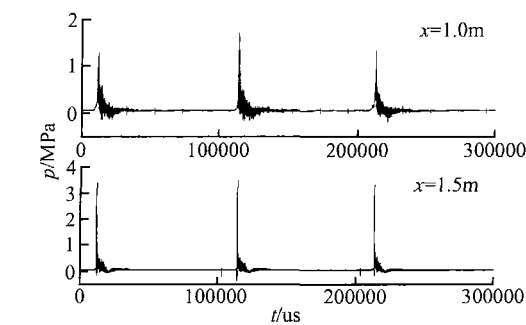


图 7 $\Delta\tau_2 = 15\text{ ms}$ 爆震管内压力时序图
Fig. 7 The history of pressure at $\Delta\tau_2 = 15\text{ ms}$

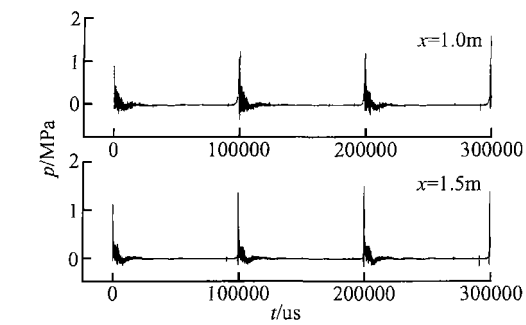


图 8 $\Delta\tau_2 = 10\text{ ms}$ 爆震管内压力时序图
Fig. 8 The history of pressure at $\Delta\tau_2 = 10\text{ ms}$

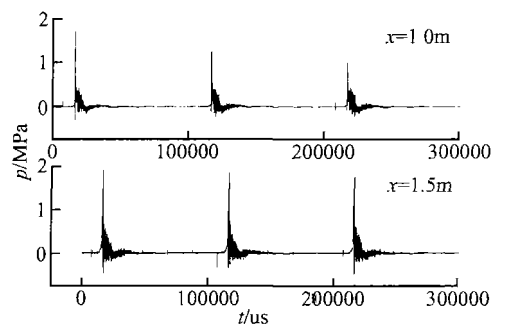


图 9 $\Delta\tau_2 = 5\text{ ms}$ 爆震管内压力时序图
Fig. 9 The history of pressure at $\Delta\tau_2 = 5\text{ ms}$

由表中数据可得 $\Delta\tau_2$ 和 $\bar{p}$ (1.5 m 处) 的关系如图 10 所示, $\Delta\tau_2$ 和 $\bar{v}$ 的关系如图 11 所示:

由图 4 到图 9 可知, 在爆震管距离电嘴 1.0 m 处, 测得的峰值压力大部分在 1.5 MPa 以下, $\Delta\tau_2$ 为 20 ms 及 15 ms 时的压力波传播速度接近理想的 CJ 波传播速度, 可知爆震波在第一个传感器附近被触发。

1) 由试验可知 PDE 在没有隔离段的情况下也不会发生连续燃烧, 是因为:

a) 液体燃料在形成可爆混气之前需要雾化,

表 1 不同 $\Delta\tau_2$ 对应的爆震波压力峰值及爆震波传播速度

Table 1 the propagation velocity and mean peak value of detonation wave							
$\Delta\tau_2 / (\text{ms})$	30	25	20	15	10	5	备注
隔离段长度(mm)	250	125	0	DDT 过程供油	超燃膨胀时间供油		
$\bar{p} / (\text{MPa})$	2.0	2.5	3.5	3.8	2.5	1.4	1.5 m 处压力
$\bar{v} / (\text{m/s})$	840	1062	1374	1409	1020	753	

蒸发, 掺混。燃料最初进入爆震室大部分以液滴形式存在, 当液滴和燃气接触后, 首先吸收周围环境的热量开始蒸发, 同时燃气温度开始下降, 这样的热量交换使得混气不可能很快的达到自燃温度;

b) 小管径的 PDE 燃烧室散热率高, 这是因为 $\frac{\text{散热面积}}{\text{容积}} \propto \frac{1}{D}$; 上循环的高温燃气的一部分热量传递给爆震管壁面, 经过爆震管的导热和外表面与周围环境的对流, 热量向外界环境散热; 且管径越小, 散热率越高; 燃气温度的降低使得新鲜混气

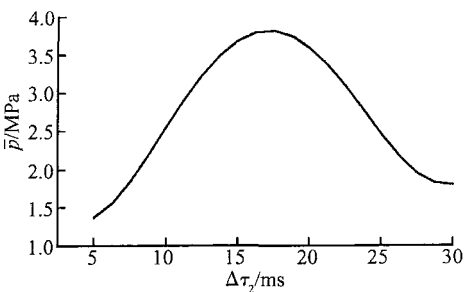


图 10 不同 $\Delta\tau_2$ 对应的平均峰值压力
Fig. 10 $\bar{p}$ Vs. $\Delta\tau_2$

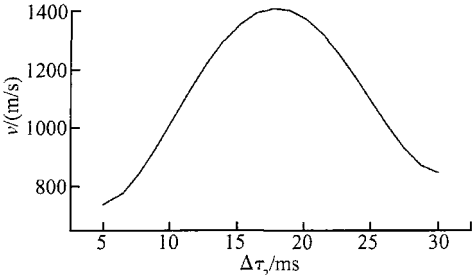


图 11 不同 $\Delta\tau_2$ 对应的平均峰值压力
Fig. 11 $\bar{v}$ Vs. $\Delta\tau_2$

需要一定的着火感应时间。

c) 小管径的 PDE 的内部空间小, 均匀混气容易形成, 热量和质量交换在整个空间进行, 不会因局部混气形成质量较好引起自燃而提前着火; 而对于大管径的 PDE, 在同一截面上存在过贫, 过富或油气比恰当的区域, 如果局部混气形成质量比较好, 当与高温燃气接触后, 容易引起局部自燃。

2) 爆震波压力和速度在 $\Delta t_2 = 15 \text{ ms}$ 时较高, 而在 $\Delta t_2 \leq 10 \text{ ms}$ 较低, 原因在于:

a) 在 $\Delta t_2 = 15 \text{ ms}$ 左右, 即亚音燃烧时间继续供油, 由图 7 和图 10 可知, 得到的爆震波峰值压力较高, 速度较大, 这是因为亚音燃烧时间继续供油, 部分燃油在高温燃气作用下裂解, 导致下一循环回流区中含有裂解后的活性分子, 因而对下循环燃烧有利, 但油耗有所增加;

b) 当 $\Delta t_2 \leq 10 \text{ ms}$ 时, 在 PDE 膨胀时段供油, 此时气动阀关闭, 供油主要停滞在 PDE 的头部, 虽然喷入的燃油不影响上循环的压力测量, 但是由于气动阀下游存在回流区, 在下一循环进气时, 回流区高温燃气和混气进行质量交换, 形成的混气含有污染成分且过富, 从而影响下一循环充分燃烧, 导致测得的压力降低。

试验验证了隔离段取消后, PDE 工作周期缩短为 90 ms , Δt_2 设定为 20 ms , 在同样的混气充填速度下, 对爆震管内压力进行测量, 得到的压力/时间曲线如图 12 所示。

3) 测得的压缩波传播速度 $\bar{u}$ 变化较大, 主要由于爆震波的触发有时不是在第一个压力传感器之前, 而在两个压力传感器之间。且亚音燃烧段越长, 平均速度越小。

4) 由图 10 和图 11 可知, 爆震波平均峰值压力随 Δt_2 的变化趋势与压缩波的传播速度随 Δt_2 的变化趋势是一致的, 实验所得的结果与理论结果是吻合的。

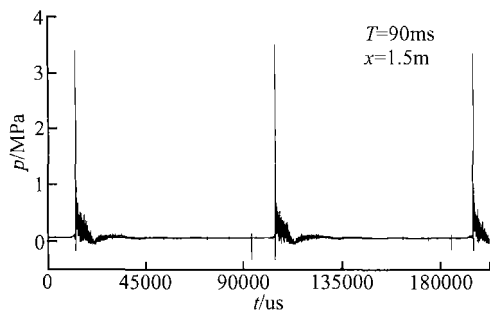


图 12 $T = 90 \text{ ms}$, $\Delta t_2 = 20 \text{ ms}$ 爆震波压力时序图

Fig. 12 The history of pressure

at $T = 90 \text{ ms}$ and $\Delta t_2 = 20 \text{ ms}$

3 结 论

1) 对于小管径 PDE, 两相混气爆震燃烧可以不设置空气隔离段。也就是说, 对于定长的混气充填, 在 PDE 的一个工作周期内可以省去隔离段充填的时间, 从而缩短了 PDE 的周期。

2) PDE 在工作过程中, 亚音燃烧的时间段内可以继续供油而不会引起自燃。燃油蒸发性能好, 爆震燃烧得到强化。

3) PDE 超燃及膨胀时间继续供油容易引起局部燃油过富, 导致爆震波的压力峰值下降, PDE 油耗增加。

参考文献:

- [1] Goracke B D, Levack D J H. Tripropellant engine drive cycle consideration for the SSTO application [R]. AIAA 95-2950.
- [2] Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines [R]. AIAA Paper 94-0263.
- [3] Bratkovich T E, Arnie M, Williams J T, et al. An introduction to pulse detonation rocket engines [R]. AIAA 97-2742.
- [4] Bussing T R A, Bratkovich T E, Hinkey Jr J B. Practical implementation of pulse detonations engines [R]. AIAA 97-2748.
- [5] Zhang F Y, Fujiwara T, Miyasaka T, et al. Detonation studies of high frequency operation pulse detonation engine with air/hydrogen [R]. AIAA 2003-1169.
- [6] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines [R]. AIAA 2002-0470.
- [7] Lu F K, Jensen D S. Potential viability of a fast acting micro-solenoid valve for pulsed detonation fuel injection [R]. AIAA 2003-0888.
- [8] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机供油自适应控制优化设计研究 [J]. 推进技术, 2005, 26(1): 62-67.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Mechanism of fuel self fit control in pulse detonation engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(1): 62-67.
- [9] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机工作过程控制和协调试验 [J]. 推进技术, 2004, (25) 6: 538-542.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Experimental investigation on working process of pulse detonation engine (PDE) [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 538-542.
- [10] Kaemming T A, Lidstone G L, Sammann B C. Proposed nomenclature guide for pulse detonation engines [R]. AIAA 2002-3631.
- [11] Knystautas R, Lee J H, Guirao C M. The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon air mixture [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 63-83.