# 混合室结构对脉冲爆轰发动机工作过程影响的试验研究\*

蒋 弢,翁春生

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094)

摘 要:为了改善两相脉冲爆轰发动机内燃油雾化混合效果,通过试验研究了文氏管、挡板、掺混器、文氏管和挡板组合、文氏管和掺混器组合这五种不同的混合室结构对管内雾化混合和燃烧转爆轰过程的影响。试验结果表明:两种组合型混合室结构的雾化混合效果优于其他三种混合室结构。文氏管和挡板组合虽然雾化效果稍弱于文氏管和掺混器组合,但是径向液滴分布上更为合理;低频时,安装文氏管和挡板平均压力峰值最高能达到4.4MPa;高频时,安装文氏管和掺混器工作频率最高能达到32Hz; 在试验范围内,改善混合室结构,形成雾化效果好和分布合理的可爆混合物有利于提高脉冲爆轰发动机的工作频率。

关键词:脉冲爆轰发动机;混合室;雾化混合;两相爆轰;燃烧转爆轰
中图分类号: V235.22
文献标识码: A
文章编号:1001-4055 (2015) 01-0017-07
DOI: 10.13675/j. enki. tjjs. 2015. 01. 003

# **Experimental Investigation of Effects of Mixing Chamber Structures on Performance of Pulse Detonation Engine**

JIANG Tao, WENG Chun-sheng

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract**: In order to improve the effects of atomization and mixing in two-phase pulse detonation engine (PDE), the experiment was carried out by installing five different kinds of structures of the mixing chamber in PDE. The experimental results show that the atomization and mixing effect of two kinds of combined chambers are better than the others. The gasoline-air distribution performance of venturi and baffle combination structure is slightly worse than that of venturi and mixer combination structure, but the radial droplet distribution of venturi and baffle combination structure is more reasonable. When the operating frequency is low, the peak pressure of PDE by installing venturi and baffle combination structure is the highest and it can reach 4.4MPa. When the PDE needs higher operating frequency, the operating frequency of PDE by installing venturi and baffle combination structure is the highest and it can reach 32Hz. In the experimental range, the effect of atomization and mixing can be improved by installing better structures of the mixing chamber in order to increase the operating frequency of PDE.

**Key words**: Pulse detonation engine; Mixing chamber; Atomization and mixing; Two-phase detonation; Deflagration to detonation transition

\* 收稿日期: 2013-12-31; 修订日期: 2014-03-11。

**基金项目**:国防预研基金(9140c300202120c30),中央高校基本科研业务专项资金资助(30920130112007)。 作者简介:蒋 弢(1985—),男,博士生,研究领域为爆轰推进。E-mail: martiai@126.com 通讯作者:翁春生(1964—),男,博士,教授,博士生导师,研究领域为爆轰推进。E-mail: wengcs@126.com

## 1 引 言

脉冲爆轰发动机(Pulse Detonation Engine,简称 PDE)是一种利用爆轰波来获得推力的新型发动机。 它推重比较大,结构简单,热循环效率高,应用前景广。

目前国内外做了不少试验来研究多种因素对脉 冲爆轰发动机的燃烧转爆轰(DDT)过程的影响。 Dean<sup>[1]</sup>和Dnih<sup>[2]</sup>等的研究得出了雾化混合效果对脉冲 爆轰发动机的燃烧转爆轰过程有重要影响的结论。 Varathalrajan<sup>[3]</sup>等研究了加快来流速度对 PDE 内液态 燃油雾化的影响。Brophy<sup>[4]</sup>等通过采用预爆轰管来快 速、稳定地起爆 PDE 主爆轰管内的燃料/空气混合 物。Schauer<sup>[5]</sup>等应用闪蒸系统(FVS)来改善非富氧和 的无预爆管条件下 PDE 内液态燃油的雾化蒸发效果, 减少DDT时间和距离。韩启祥<sup>[6,7]</sup>等研究了锯齿型扰 流器、环型扰流器、螺旋型扰流器、多管蒸发器和半球 型激波反射器等助爆装置作用下爆震管内的火焰传 播速度及压力变化历程。范玮<sup>[8,9]</sup>等研究了引射器和 扰流片对脉冲爆震火箭发动机性能的提高作用。翁 春生[10-15]等通过提高进气压力和供气含氧量等措施来 改善爆轰管内的燃油的雾化蒸发混合状况,进而来提 高PDE的工作频率、推力和爆轰波峰值压力。

国内外学者对气液两相爆轰发动机工作过程做 了大量的研究,通常是单独研究液滴雾化过程或者 PDE的起爆过程,对起爆过程前的液体喷射、雾化、 蒸发及两相混合过程和起爆过程同时研究的较少, 而混合室结构又对液体燃料的喷射、雾化、蒸发及两 相混合过程影响很大。本文建立了一套以液态汽油 为燃料的两相脉冲爆轰发动机试验系统,通过安装 不同结构的混合室来研究脉冲爆轰发动机内的雾化 混合过程和燃烧转爆轰过程,并分析混合室结构对 脉冲爆轰发动机性能的影响。

#### 2 试验系统介绍

#### 2.1 试验系统

气液两相脉冲爆轰发动机试验装置的主要部件 包括 PDE 本体、供气系统、供油系统、点火控制系统 和测试系统等,试验装置如图1所示。

#### PDE长1200mm,内径80mm。

PDE由混合室、点火室和爆轰室组成,在爆轰管 头部设置3个夹角为120°的切向进气孔供气,在混合 室内安装精细雾化离心喷嘴,其喷射出的燃油液滴 经过雾化蒸发,与氧化剂混合形成雾化良好、混合充 分、分布均匀的可爆混合物。在点火室内安装高能 点火器,可在0~70Hz间工作。为了强化爆轰波的形成,需在爆轰室内安装扰流装置和激波强化装置。



Fig. 1 Schematic of the PDE

测试系统主要包括马尔文粒度仪、压力传感器、 数据采集系统、冷却水系统及其管路等。在点火室 前的管壁上开测试窗口,马尔文粒度仪安装在此处 通过激光的米氏散射来测量汽油液滴的分布。在爆 轰管出口沿其轴向设置压力传感器,标记为P1(距离 出口最近)和P2,P1和P2间的距离为100mm。压力 传感器采用高精度动态压力传感器。由于压力传感 器在工作时对温度有一定的要求,当爆轰管的温度 超过压力传感器的工作范围时,压力传感器测出的 数据将产生漂移。因此,试验中采用了冷却水套对 压力传感器进行冷却,通过不断地注入流动的冷却 水来保证压力传感器在正常环境下工作。压力传感 器捕捉的爆轰波瞬时信号经过信号调理器后,由四 通道数据采集卡进行数据采集。

#### 2.2 试验流程

脉冲爆轰发动机的工作过程包括新鲜燃料与氧 化剂的填充、燃料雾化蒸发及与氧化剂的混合、点火 后燃烧转爆轰过程,以及爆轰波后燃气的排出。试 验过程中首先设定供气压力和供油压力,开启电磁 阀后,汽油通过喷嘴喷射入PDE管混合室内,与氧化 剂进行混合,用马尔文粒度仪测量点火室前的液滴 分布,然后通过火花塞点火器点燃,在扰流装置和激 波强化装置作用下,形成稳定的爆轰波,压力传感器 随之采集数据传输到计算机中。安装表1列5种不 同结构的混合室后按上述流程多次测量(表1中文氏 管的喉道面积比为0.25,挡板阻塞比为0.4375,掺混 器阻塞比0.25)。

Table 1	<b>Different structures</b>	of	mixing	chamber
---------	-----------------------------	----	--------	---------

	~
Code	Structure
a	Venturi
b	Baffle
с	Mixer
d	Venturi and baffle
e	Venturi and mixer

### 3 试验结果分析

#### 3.1 混合室结构对液滴分布的影响

安装不同结构的混合室,分别测量在相同的进气 压力和进油压力下脉冲爆轰发动机管内点火区前液 滴的尺寸分布状况。试验结果见表1、图2和图3,其 中图2和图3中的(a),(b),(c),(d)和(e)对应着表1所 示的5种不同结构的混合室。图2中红色柱形图代表 着液滴的概率分布,黑色曲线代表着液滴的累积分 布。图3纵坐标为径向上测量区距中轴线的距离。

 
 Table 2
 Effects of different structures of mixing chamber on the droplet size

Code	SMD/µm
a	171.1
b	226.9
с	196.3
d	151.6
e	147.8

试验结果表明:安装文氏管时,点火区前液滴索 泰尔平均直径为171.1μm,离心喷嘴喷射出的一次 雾化燃油液滴部分直接穿过文氏管喉部,在文氏管 喉部高速气流作用下二次雾化,部分喷射在文氏管 的光滑表面,形成薄的均匀油膜,在切向气流作用 下破碎剥离出尺寸较小的液滴,雾化效果较好,直 径小于300μm的液滴占总体积的91%,在尺寸分布





上明显向小颗粒方向偏移;在径向分布上由于油气 混合物经过文氏管的扩张段,气流向着管壁方向运动,粒径越小的液滴惯性越小,跟随性越好,大量从 油膜上剥离出的小尺寸液滴被气流带着向壁面运动,聚积成一些稍大尺寸的液滴,所以越靠近管壁, 液滴索泰尔平均直径越大,但是管壁处和轴线上液 滴索泰尔平均直径仅相差30μm,差距不大。

安装挡板时,点火区前液滴索泰尔平均直径为 226.9μm,雾化效果很差,比安装文氏管时大了 55.8μm,直径小于300μm的液滴仅占总体积的47%, 在尺寸分布上明显向大颗粒方向偏移,同时由于离 心喷嘴喷射出的燃油液滴大量聚集在管壁附近,在 气流带动下和挡板相撞击,形成占总体积5%的小尺 寸液滴;在径向分布上由于挡板的阻挡,大量的大尺 寸液滴基本上被约束在管子中部运动,所以在径向 上 0~3cm 处液滴索泰尔平均直径差距较小,而粒径 小的液滴惯性小,容易被气流带向壁面,在管壁处液 滴索泰尔平均直径迅速减小,同时由于其数量也较 少,在壁面附近不易聚积成大液滴,在图2(b)上表现 出不连续的峰值。



Fig. 3 Curve of SMD in the radial direction

安装掺混器时,点火区前液滴索泰尔平均直径 为196.3μm,离心喷嘴喷射出的燃油液滴部分直接穿 过掺混器和管壁之间的空间,在加速气流作用下二 次雾化,部分喷射在掺混器的光滑表面,形成薄的均 匀油膜,在切向气流作用和后续液滴撞击下剥离出 占总体积7%的小尺寸液滴,雾化效果比文氏管稍 差,直径小于300μm的液滴占总体积的63%,在尺寸 分布上呈现明显的双峰分布,且双峰很窄,小尺寸液 滴集中在30~60μm,大尺寸液滴集中在180~420μm; 在径向分布上由于大尺寸液滴直接穿过掺混器和管 壁之间的空间,惯性较大,受气流影响较小,大部分 聚积在管壁附近,而剥离出的小尺寸液滴跟随性越 好,被气流带着向轴线运动,所以越靠近管壁,液滴 索泰尔平均直径越大,且管壁处和轴线上液滴索泰

安装文氏管和挡板时,点火区前液滴索泰尔平 均直径为151.6μm,比只安装文氏管时小19.5μm,说 明挡板有一定的雾化作用,同时由于液滴撞击挡板, 既产生了部分小液滴,也聚积出部分大液滴,所以直 径小于300μm的液滴占总体积的84%,比只安装文 氏管时有所减少,尺寸分布区间更加广,峰值有所降 低;在径向0~3cm处,液滴索泰尔平均直径变化趋势 和只安装文氏管时相似,而由于挡板的作用,跟随性 越好的小尺寸液滴随着气流向着管壁方向运动,在 管壁处液滴索泰尔平均直径有所减小,减小幅度比 只安装挡板时略小。

安装文氏管和掺混器时,点火区前液滴索泰尔 平均直径为147.8µm,比只安装文氏管时小23.3µm, 比只安装掺混器时小48.5μm,虽然在5种结构中雾 化效果最好,但是在文氏管后增加掺混器对雾化的 促进作用没有单独使用掺混器时明显,同时由于液 滴撞击掺混器上的油膜,很容易飞溅出更小尺寸的 液滴,掺混器将液滴聚积在管壁附近容易形成大尺 寸液滴,所以从尺寸累积分布上看出直径小于 300μm的液滴占总体积的74%,比只安装文氏管时 减少17%,比只安装掺混器时增加11%,在尺寸概率 分布上为更明显的双峰分布,小尺寸液滴集中在10~ 50μm,大尺寸液滴集中在150~450μm;在径向0~3cm 处,液滴索泰尔平均直径变化趋势和只安装文氏管 时相似,而由于掺混器的作用,在壁面附近越靠近管 壁,液滴索泰尔平均直径越大,且管壁处和轴线上 液滴索泰尔平均直径超大,且管壁处和轴线上

文氏管能较大程度地促进雾化,挡板能改善壁 面附近的液滴尺寸分布,掺混器虽然整体雾化效果 不差,但是容易在管壁附近聚积液滴。将上述三种 结构单独或者组合起来使用的效果来看后,同时安 装文氏管和挡板虽然雾化效果稍弱于同时安装文氏 管和掺混器,但是径向液滴分布上更为合理。

## 3.2 混合室结构对 PDE 工作频率和爆轰波压力的 影响

本节的热态试验的条件和 3.1 节的冷态试验条件完全一致,先对不同混合室结构下 10Hz 的爆轰波 压力曲线进行研究。

图4为安装五种不同混合室结构时,PDE出口测 得的压力/时间曲线。判定爆轰波是否形成的关键依 据主要是爆轰波的峰值压力、爆轰波形状和爆轰波速 度。从图4可以看出,安装文氏管和挡板组合结构(图 4(d))时,发动机工作很稳定,管内测得的压力峰值在 4.0~4.8MPa,平均峰值压力为4.4MPa,爆轰波速度为 1615m/s,且压力上升时间为10us;安装文氏管和掺混 器组合结构(图4(e))时,管内测得的压力峰值在3.6~ 4.0MPa,平均峰值压力为3.8MPa,比安装文氏管和挡 板组合结构时测得的爆轰波平均压力峰值低大约 0.6MPa,爆轰波速度为1524m/s;安装文氏管(图4(a)) 时,管内测得的压力峰值在2.6~4.0MPa,平均峰值压 力为2.7MPa,爆轰波速度为1339m/s,比安装文氏管和 掺混器组合结构时低185m/s;安装掺混器(图4(c)) 时,管内测得的压力峰值在2.2~3.0MPa,平均峰值压 力为2.5MPa,爆轰波速度为1210m/s;安装挡板(图4 (b))时,管内测得的压力峰值在1.5~2.7MPa,平均峰 值压力为2.0MPa,部分时刻P2处的压力峰值较低,爆





图 5 为在安装五种不同混合室结构时, PDE 按最 高频率工作时出口P1测得的压力/时间曲线。从图5 可以看出,安装文氏管和掺混器组合结构时,发动机 基本能以32Hz稳定地工作,管内测得的压力峰值值 在1.5~2.5MPa 目压力峰值波动幅度较大,爆轰波速 度为1322m/s;安装文氏管和挡板组合结构时,发动 机能以28Hz稳定地工作,比安装文氏管和掺混器组 合结构时低4Hz,但是管内测得的压力峰值值在2.0~ 3.5MPa,比安装文氏管和掺混器组合结构时高 0.5MPa 且工作更加稳定,爆轰波速度为1451m/s;安 装文氏管时,发动机能以25Hz稳定地工作,管内测得 的压力峰值在1.8~3.0MPa,爆轰波速度为1372m/s; 安装掺混器时,发动机能以20Hz稳定地工作,管内测 得的压力峰值在1.5~3.2MPa,爆轰波速度为1341m/s; 安装挡板时,发动机能以15Hz工作,管内测得的压力 峰值在 0.8~2.0MPa 且浮动很大, 部分时刻未能起爆, 发动机工作时不太稳定。

试验结果表明:混合室结构对脉冲爆轰发动机 的燃烧转爆轰过程有重要的影响。安装文氏管和掺 混器组合结构时,雾化效果最佳,液滴尺寸最小,能 较快的蒸发,形成均匀的可爆混合物,能较容易的燃 烧转爆轰,但是径向分布稍差,在管壁处聚积大量液 滴不利于蒸发,增加了燃烧转爆轰的时间和距离,造 成了低频工作时爆轰波压力峰值和速度比安装文氏 管和挡板组合结构偏低,而且液滴容易聚积在点火 头上使高频工作时不太稳定;安装文氏管和挡板时, 雾化效果比安装文氏管和掺混器时稍差,却远优于 其他三种结构,而且径向分布最好,在点火端能形成 配比恰当的均匀可爆混合物,点火后更容易燃烧,放 出更多的能量来提高该区域的温度和压力和加快汽 油液滴剥离蒸发速度,能减少DDT的时间和距离,所



(d) Venturi and baffle



Fig. 5 Pressure profiles of the highest frequency

以爆轰波压力峰值最高,速度最大,但是高频工作时 由于堵塞比较大,使得其工作频率比安装文氏管和 掺混器时稍低;安装其他三种结构时,雾化效果和径 向分布都不如前2种,所以工作频率和爆轰波压力也 都不如前2种结构。

### 4 结 论

本文通过对安装不同混合室结构的脉冲爆轰发 动机的试验研究,研究结果表明:

(1)文氏管能较大程度地促进雾化,挡板能改善 壁面附近的液滴尺寸分布,掺混器虽然整体雾化雾 化效果不差,但是容易在管壁附近聚积液滴。将上 述三种结构单独或者组合起来使用的效果来看后, 同时安装文氏管和挡板虽然雾化效果稍弱于同时安 装文氏管和掺混器,但是径向液滴分布上更为合理。

(2)低频时,安装文氏管和挡板平均压力峰值最 高能达到4.4MPa;高频时,安装文氏管和掺混器工作 频率最高能达到32Hz。

(3)在试验范围内,改善混合室结构,形成雾化 效果好和分布合理的可爆混合物有利于提高 PDE 的 工作频率。

研究结果对脉冲爆轰发动机混合室的设计和改进有一定的指导价值,有助于改善爆轰管内雾化混合效果来提高 PDE 工作频率。

#### 参考文献:

- [1] Dean A J. Recent Development in Approaches to Pulsed Detonation Propulsion(Invited)[R]. AIAA 2003-4510.
- [2] Dinh T N. An Investigation of Droplet Breakup in a High Mach, Low Weber Number Regime [C]. Reno: 41th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2002.
- [3] Lasheras J, Varatharajan B, Varga C, et al. Studies of

23

Fuel Distribution and Detonation Chemistry for Pulse Detonation Engines [R]. *ISABE* 2001-1174

- [4] Bropht C M, Werne RT L T S, Sinibaldilr J O. Performance Characterization of a Valveless Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2003-1344.
- [5] Miser Christen L, King Paul I, FR Schauer. PDE Flash Vaporization System for Hydrocarbon Fuel Using Thrust Tube Waste Heat[R]. AIAA 2005-3511.
- [6] 孙 健,韩启祥,王家骅.助爆装置影响两相混气中爆震波触发特性实验[J].推进技术,2013,34(7): 997-1001. (SUN Jian, HAN Qi-xiang, WANG Jia-ye. Experimental Investigation on Detonation Devices Induce Detonation in Two-Phases Mixed Gas[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(7): 997-1001.)
- [7] 韩启祥,王家骅,王 波.预混气爆震管中爆燃到爆 震转捩距离的研究[J].推进技术,2003,24(1):63-66. (HAN Qi-xiang, WANG Jia-ye, WANG Bo. Investigation of Deflagration to Detonation Transition Distance in a Tube with Mixture[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(1):63-66.)
- [8] 朱旭东,范 玮,王 可,等. 通过壁温确定脉冲爆 震波形成的位置[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 313-316. (ZHU XU-dong, FAN Wei, WANG Ke, et, al. Determination of Formation Position for Detonation Wave by Wall Temperature in Pulse Detonation Rocket Engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33

(2):313-316.)

- [9] 王永佳,范 玮,高 瞻,等.脉冲爆震火箭发动机 引射模态的起爆实验研究[J].推进技术,2013,34
  (8):1147-1152. (WANG Yong-jia, FAN Wei, GAO Zhan, et al. Experimental Investigation on Initiation in Main Detonation Chamber at Ejector Mode of a PDRE
  [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(8): 1147-1152.)
- [10] 白桥栋,翁春生.供气含氧量对脉冲爆轰发动机性能 影响的试验研究[J].弹道学报,2011,23(3):5-8.
- [11] 李 宁,翁春生.无阀式汽油/空气两相脉冲爆轰发动机试验研究[J].弹道学报,2010,22(4):242-250.
- [12] 翁春生,王 杰,白桥栋,等.脉冲爆轰发动机进气 压力对爆轰影响的试验研究[J].弹道学报,2008,20 (3):1-4.
- [13] 蒋 弢,翁春生.雾化混合对气液两相脉冲爆轰发动机工作过程的影响[J].南京理工大学学报,2013,37
   (5): 692-698.
- [14] 蒋 弢,翁春生.文氏管对气液两相脉冲爆轰发动机
   工作过程影响的数值模拟[J].工程力学,2014,31
   (1): 229-235.
- [15] 蒋 弢,翁春生.喷嘴位置对脉冲爆轰发动机性能影响的试验研究[J].实验流体力学,2014,28(1):44-48.

(编辑:张荣莉)