

文章编号: 1672-9897(2016)01-0015-13

doi: 10.11729/sytlx20150135

# 微尺度爆震燃烧研究进展

何建男, 范 玮\*

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

**摘要:** 微尺度爆震燃烧(Microscale Detonation)是基于微燃烧(Microscale Combustion)和微动力机电系统(Power MEMS)提出来的新研究方向。目的是为了把爆震燃烧这一高效的燃烧方式应用于微动力领域, 以解决人们对小型、高性能动力的需求。几十年来, 人们虽然在爆震燃烧的研究中涉及了一些与微爆震相关的内容, 但是对其机理的了解仍然十分不足。本文从微爆震基本概念出发, 对其现象、成因、影响因素及需要解决的问题等方面进行综述, 总结了目前国内外重要的研究成果, 为今后进一步的探索提供参考。

**关键词:** 微尺度爆震; 微尺度燃烧; 微动力机电系统; 近极限爆震; 微推进器

中图分类号: V231.2<sup>+2</sup> 文献标识码: A

## Progress in the microscale detonation research

He Jiannan, Fan Wei\*

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Microscale detonation is a new research subject based on the concepts of microscale combustion and power micro electro mechanical systems, which aims to meet the increasing demand for small but high performance power system by utilizing detonation combustion with high thermal efficiency. Although microscale detonation research has partially been involved in the conventional investigations of detonation for decades, its fundamental mechanisms are still poorly understood. In this paper, an overall review on the phenomenon, origins, influence factors and challenges of microscale detonation as well as its basic concepts is provided. Significant results to date are summarized, which may contribute to the further exploration of this subject.

**Keywords:** microscale detonation; microscale combustion; power MEMS; near-limit detonation; micro thruster

## 0 引言

燃烧作为一种释放能量的氧化反应, 一直都在被人类研究和利用着。进入21世纪, 随着人口的增加和科技的发展, 人们对能源和动力的需求不断扩大。虽然现在已有多种获取能量的途径, 但是碳氢燃料的燃烧依然是最主要的来源。与此同时, 随着环境污染、能源紧缺、利用率低、成本增加等问题的出现, 人们亟需研制出高性能、高能量密度、轻便耐用的能源动力系统。

在动力研究领域, 提高系统性能的方法一般有如下几种: 一是选择高能能量源; 二是提高能量转化率和利用率; 三是系统小型化。图1对比了锂电池与碳

氢燃料和其它不同发动机的单位能量密度<sup>[1]</sup>, 可以看出锂电池的能量密度非常低。有文献表明, 目前最先进的锂电池能量密度仅有0.2 kWh/kg<sup>[2, 3]</sup>, 是天然气的1/60, 这也是碳氢燃料被广泛利用的重要原因。另一方面, 图1也显示了微型发动机对于锂电池的较大优势(其能量密度是锂电池的6~8倍)。动力系统小型化的优势在于, 它能大幅减少系统部件的数量和重量, 进而提升性能。基于此, 近二十年来, 国内外涌现了大量关于微动力机电系统(Power Micro Electro Mechanical Systems, 简称Power MEMS)的研究<sup>[4-6]</sup>, 包括微型燃烧器<sup>[7-8]</sup>、微型燃气轮机<sup>[9-11]</sup>、微型推力器<sup>[12-14]</sup>、微型燃料电池<sup>[15-17]</sup>、微型热光电系统<sup>[18-20]</sup>等等, 这些新型动力源的出现证明了系统小型

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(91441201, 51176158, 51376151); 教育部博士点基金项目(20126102110029)

\*通信作者 E-mail: weifan419@nwpu.edu.cn

引用格式: He J N, Fan W. Progress in the microscale detonation research, 2016, 30(1): 15-27. 何建男, 范 玮. 微尺度爆震燃烧研究进展. 实验流体力学, 2016, 30(1): 15-27.

化的可行性和潜在价值,Chigier<sup>[21]</sup>甚至认为微型燃烧器可以达到10kWh/kg的能量密度。

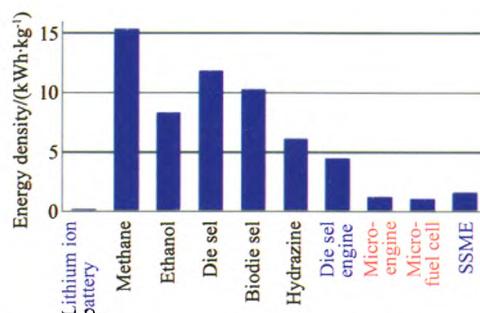


图1 锂电池与碳氢燃料和其它不同发动机的单位能量密度对比<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Comparison of specific energy densities of lithium ion batteries with hydrocarbon fuels as well as different engines<sup>[1]</sup>

尽管如此,基于微尺度燃烧的微动力机电系统研究依然面临很大挑战,其中需要解决的关键问题是如何提高能量转化率和利用率,具体而言,就是提高燃烧效率、热循环效率以及减少能量损失。目前,绝大多数微动力系统都是基于稳态、爆燃燃烧方式,热循环效率不高;随着体积减小,面容比增大,热损失将增加;而且,有些系统内部的机械部件也会增加能量损失。因此,很多研究者都从减少系统运动部件、添加催化剂、制造新材料等方面改进和提升微动力系统的性能。除此之外,人们也可以从改进燃烧模式本身入手来解决这一问题。

众所周知,爆震燃烧是一种以较低的熵增实现极快化学反应的过程。通常情况下,爆震波能以较低的点火能量起始,经过爆燃向爆震的转变(Deflagration to Detonation Transition,简称DDT<sup>[22]</sup>),使燃烧波与激波耦合,达到“自增压”的效果,同时释放巨大的能量。这一特性可以省去传统发动机的增压部件。从理论上讲,基于爆震燃烧的脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine,简称PDE)有近似等容循环的效率,比常规发动机的等压循环热效率高<sup>[23]</sup>。

可以看出,爆震燃烧的优势几乎满足所有微动力系统的需求,如果将二者结合,很可能成为一个极具价值的研究领域。尽管“微尺度爆震燃烧”(Microscale Detonation Combustion)这一概念在国内外并没有被正式提出,关于微爆震动力装置的研究更是少之又少,但是与其密切相关的基础研究,比如近极限爆震、火焰在小尺度管内的燃烧和传播、DDT形成、边界条件和爆震稳定性等内容,已被许多学者深入探索过。本文的目的是对近年来与微尺度爆震(以下简称微爆震)有关的文献进行综述,总结人们对其相关机理的阐述,指出其研究价值、需要解决的问题

和研究前景等。为了更好地对比分析,其中也会涉及中、大尺度爆震/爆燃燃烧的内容。

## 1 微爆震尺度的界定及燃烧理论的适用性

一直以来,人们对燃烧尺度的界定都没有统一、严格的标准。不同研究者从各自角度出发定义的微尺度(Microscale),中尺度/介观尺度(Mesoscale)和大尺度(Macroscale),其范围多有重合。Ju总结了3种定义尺度范围的方法<sup>[1]</sup>,第1种是按照燃烧器的实际尺寸划分:如果小于1mm,称为“微尺度”,如果大于1mm且小于1cm,则称为“中尺度”,这种定义常用于微型发动机领域<sup>[2]</sup>;第2种是用火焰的熄火直径定义:如果燃烧器的尺寸小于/大于熄火直径,则称其为“微尺度”/“中尺度”,这种定义常用于微燃烧的机理研究中,但不足之处在于,火焰的熄火直径常与燃料的种类和壁面条件等因素有关,这给尺度的定量区分带来了困难;第3种是将所研究的燃烧器与常规同种类、同用途的大尺度燃烧器作对比,以“相对于”后者的大小作出定义。比如,微型卫星的燃烧器尺寸相对于常规卫星而言可以称为“微小”,但它的实际尺寸不一定“小”<sup>[24]</sup>。这种定义常用于某种特定用途的推力器。

对于爆震燃烧尺度的界定,本文同样参考以上方法。从机理上来说,爆震波的起始、传播和熄火尺寸与其胞格尺寸和工况有关<sup>[22, 25]</sup>,一般是 $10^{-1} \sim 10^2$  mm量级<sup>[26]</sup>。从工程应用上来说,一个微爆震燃烧器的内径大概在1~10 mm量级(常规PDE的内径定义为几十毫米<sup>[27]</sup>)。因此,综合来看,微爆震的尺度在零点几到几毫米之间较为合适,中尺度爆震在十几毫米以上,而大尺度爆震则为几十毫米以上<sup>[28]</sup>,甚至不受空间、尺寸限制<sup>[25]</sup>。

有些学者担心尺寸的减小会使传统流体力学理论的连续性假设不适用于微尺度燃烧<sup>[29]</sup>,因为如果气体的平均分子自由程与流场的特征长度之比——克努森数(Knudsen Number)变大,流场近壁面的扩散输运会变得不均衡,稀薄气体效应会变得明显。除此之外,燃烧产生的高温或压力的降低也会增加平均分子自由程,进而增大克努森数<sup>[6]</sup>。但是Li等人<sup>[30]</sup>对此的研究证明,该影响十分小,也就是说,传统的流体和燃烧理论仍然适用于微尺度燃烧领域<sup>[6, 31]</sup>,而根据上文对微爆震尺度的定义,可知该尺度也是远大于平均分子自由程的,因此连续性假设同样适用于微爆震。

## 2 微尺度下的爆震燃烧现象和分类

自从爆震现象被发现以来,出现了很多对爆震的命名,比如 C-J 爆震(Chapman-Jouguet Detonation)、低速爆震(Low-velocity Detonation)、螺旋爆震(Spinning Detonation)、驰震爆震(Galloping Detonation)、结巴爆震(Stuttering Detonation)等;除此之外,也有很多与爆震相关的火焰形式,如慢速/高速爆燃(Slow/Fast Deflagration)、振荡火焰(Oscillating Flame)、熄火(Quenching Flame)等。这些名称有的基于燃烧现象命名(如振荡火焰),有的基于爆震波/爆燃波速度命名(如低速爆震、慢速/高速爆燃等),有的基于爆震强度、稳定性命名(如 C-J 爆震等),甚至有的命名含义模糊,容易混淆。造成这种结果的原因是由于爆震燃烧的复杂性,研究者很难从单一角度对其进行明确的定义和分类。在大多数研究近极限爆震的文献里,常见以下几种对爆震现象的划分:

从速度上来看,燃烧波只有爆燃(Deflagration)和爆震(Detonation)2 大类<sup>[22, 25]</sup>,前者相对于反应物以较低的亚声速传播,后者则是一道超声速的燃烧波。在某些条件下,爆燃波可以加速成为高速爆燃波(Fast Deflagration),也可转变为爆震波;而爆震波在小管道或者粗糙边界条件下传播时速度会降低,有可能成为低速爆震(Low-velocity Detonation),也称为“准爆震”(Quasi Detonation),它在速度上与高速爆燃是重合的,因此二者很难界定<sup>[25]</sup>。

从爆震的稳定性来看,有的学者以爆震波是否有规则胞格结构为准,将爆震分为稳定爆震(Stable Detonation)和不稳定爆震(Unstable Detonation),相应地,把能否产生规则结构的混合物称为稳定/不稳定混合物(Stable/Unstable Mixture)。他们认为,稳定爆震的失效只与损失有关,受胞格的不稳定性影响较小;而不稳定爆震既受胞格的不稳定性影响,又受湍流影响<sup>[32, 33]</sup>。通常情况下,只有高度稀释了的气体燃料混合物才有稳定的胞格结构。实际上,由于爆震波具有复杂的三维结构,从本质上讲爆震都是不稳定的。

另一种命名也是稳定/不稳定爆震(Steady/Unsteady Detonation)。该命名使用得比较随意,没有统一的定义,有些学者把它与 Stable/Unstable Detonation 混淆用,一般指爆震波是否以较稳定的速度或状态传播。从这一点来说,C-J 爆震是稳定的,而驰震爆震和结巴爆震是不稳定的。

### 2.1 C-J 爆震

根据燃烧(爆震)理论,C-J 爆震是 Rankine-Hugoniot 曲线上具有最小熵增的燃烧解<sup>[22, 25]</sup>。早在上世纪七十年代就已经有人成功实现了中尺度管道内汽油混合物的 C-J 爆震<sup>[34]</sup>,以 Lee 的团队<sup>[25]</sup>为代表的很多研究者也都以预爆管的形式研究过小尺度的 C-J 爆震。但近年来,Wu 等人<sup>[35-36]</sup>率先在内径  $d=0.5, 1, 2$  和  $3\text{ mm}$  的光滑管内较清晰地拍摄到了 C-J 爆震波由静止起爆、传播的过程(见图 2),他们使用的是常温常压、化学恰当比的乙烯-氧气混合物。随后,何建男等人<sup>[37]</sup>拍摄并分析了  $6\text{ mm}$  管道内当量比  $\Phi=0.8, 1.4, 2.2$  的 C-J 爆震现象(见图 3)。与预爆管起爆不同的是,静止起爆的火焰要经过 DDT 过程,伴随着速度变化,火焰也要经历指尖形、郁金香形、DDT 转变和回爆(Retonation)、平面火焰等多种变化,其中包含了复杂的化学动力学机理。

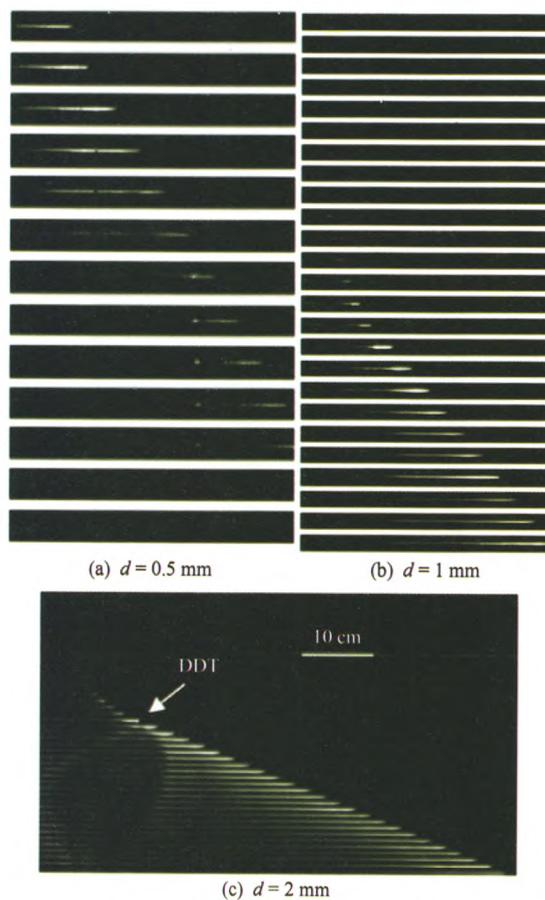


图 2 Wu 拍摄到的微爆震现象<sup>[35-36]</sup>  
Fig. 2 Micro-detonation phenomenon captured by Wu<sup>[35-36]</sup>

此外,Wu 还进行了  $260$  和  $120\mu\text{m}$  微小间隙内的平面爆震实验<sup>[38-39]</sup>,火焰在点火后形成一个圆环,其边缘随着火焰加速而不断褶皱,DDT 则发生在环形火焰的局部爆炸点。图 4(a)和(b)的烟迹清晰呈现了爆震波留下的胞格结构,在图 4(c)里也可以从

蓝色火焰中看到胞格结构。

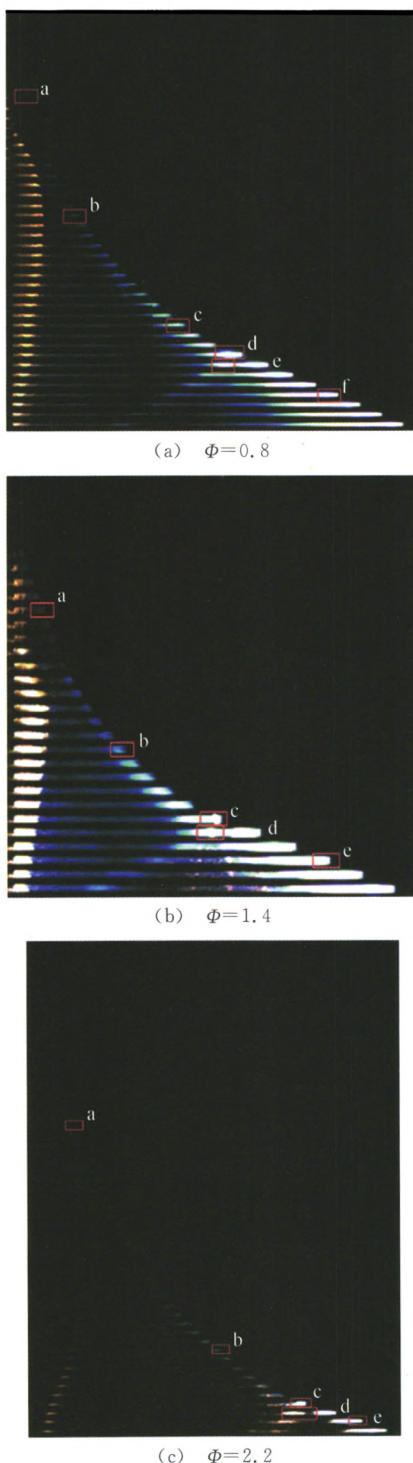


图 3 何建男拍摄到的微爆震现象<sup>[37]</sup>

Fig. 3 Micro-detonation phenomenon captured by He<sup>[37]</sup>

DDT 起爆的机理一直是个难题, 它不但有非 DDT 起爆(如常见的预爆管起爆)的速度损失问题, 还涉及爆燃燃烧及其转变过程, 对于小尺度管道而言, 研究难度更大。这方面的内容在 3.2 节会讨论。

## 2.2 螺旋爆震

螺旋爆震分为单头(Single-headed)和多头(Multi-headed)。单头螺旋爆震最早由 Campbell 等

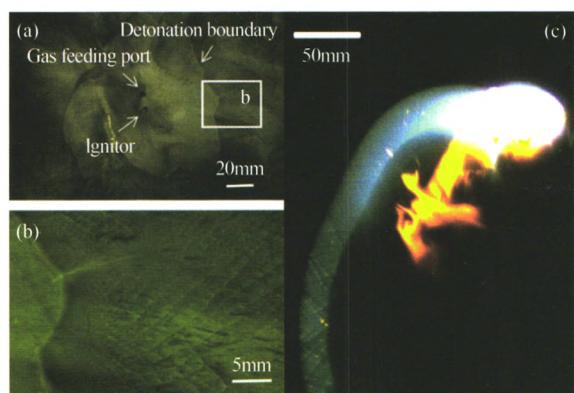


图 4 260  $\mu\text{m}$  间隙内爆震波的烟迹和高速摄像图片<sup>[38-39]</sup>

Fig. 4 Soot records and high speed camera picture of the 260  $\mu\text{m}$  gap detonation<sup>[38-39]</sup>

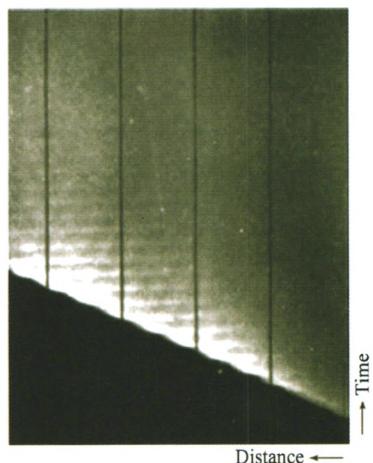


图 5 Campbell 拍摄到的螺旋爆震<sup>[40-41]</sup>

Fig. 5 Spinning detonation captured by Campbell<sup>[40-41]</sup>

人在实验中发现<sup>[40-41]</sup>, 他们在  $d=15\text{ mm}$  的管内拍摄到了一氧化碳、氢气和氧气混合物螺旋爆震的条纹照片(图 5)。可以看到, 条纹照片的轨迹前端呈现规律性的波动, 意味着爆震波面(Detonation Front)的速度是周期性变化的。然而, 爆震波平均传播速度却是稳定的 C-J 速度。Schott<sup>[42]</sup>最先在  $d=25.4\text{ mm}$  的管内拍摄到了乙炔-氧气-氩气混合物的单头螺旋爆震轨迹(图 6)。经过几十年的研究, 人们已经基本了解到, 单头螺旋爆震是一种在接近极限情况下(通常是很低的初始压力和较稀释的燃料)产生的爆震现象, 是过驱爆震瞬间衰减后维持在 C-J 速度附近的一种状态, 也就是说, 单头螺旋爆震几乎是爆震波能够自持的边界, 如果低于某个临界速度, 它会衰减甚至消失<sup>[25]</sup>。从结构上来讲, 较弱的单头螺旋爆震是一个沿管径作螺旋状传播的横波, 其螺距约为 3 倍管径, 几乎与燃料种类和初始压力无关。稍强螺旋爆震的横波则是左右双向传播的。如果爆震强度更大, 则会产生不只 1 道横波, 多个激波在管内沿周向相互碰撞反射, 就会产生多头爆震。多头螺旋爆震可以看成是单头螺旋爆震的高频形式, 由于其具有明显的胞格

结构,它通常称为胞格爆震(Cellular Detonation)。图7简要地画出了单头和多头螺旋爆震的结构<sup>[43-44]</sup>,其中可见双头螺旋有2道左右相反的横波沿着管壁运动(图7(b)),而四头螺旋则在左右方向各有两道相反的横波(图7(c)和图7(d))。



图6 Schott 拍摄到的螺旋爆震<sup>[42]</sup>  
Fig. 6 Spinning detonation captured by Schott<sup>[42]</sup>

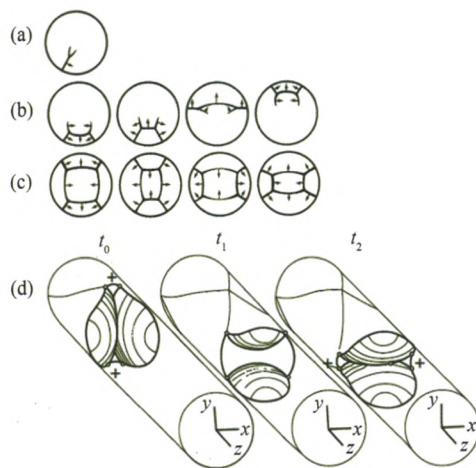


图7 (a)单头,(b)双头,(c)四头螺旋爆震简图<sup>[44]</sup>,  
(d)四头螺旋爆震的三维简图<sup>[43]</sup>

Fig. 7 Sketch of (a) single-, (b) double-, and (c) four-headed spinning detonation<sup>[44]</sup>(d) three-dimensional sketch of a four-headed spinning detonation<sup>[43]</sup>

自从螺旋爆震被发现以来,人们几乎都是在中尺度以上的管道内研究此现象<sup>[42, 45-47]</sup>,微小尺度的研究非常少。Manzhalei 等人<sup>[48-49]</sup>较早地在 5~27 mm 的管道内研究了激波前温度对爆震稳定性的影响,Kitano 等人<sup>[50]</sup>用烟迹法在 3, 6 和 10 mm 内径的管道内观察了氢气-氧气混合物在不同压力和当量比下的螺旋爆震,发现在 DDT 形成后(见图 8(a)),胞格开始生成。在图 8(b)处,可以看到多头螺旋爆震转变为单头螺旋爆震,之后爆震波以较稳定的速度传播(见图 8(c))。Camargo 等人<sup>[33]</sup>在 1.8, 6.3 和 9.5 mm 内径的管道内拍摄了稳定混合物和不稳定混合物的螺旋爆震和驰震爆震。

### 2.3 驰震爆震、结巴爆震及其它不稳定燃烧模式

结巴爆震和驰震爆震都是比螺旋爆震更不稳定的爆震形式。前者的爆震波以较低的速度传播,且速度有很快的周期性波动<sup>[25]</sup>;后者比前者更不稳定,在某些情况下,激波和燃烧波解耦,速度降低,而在一段时间后,燃烧波面又突然变亮——某些文献称为二次

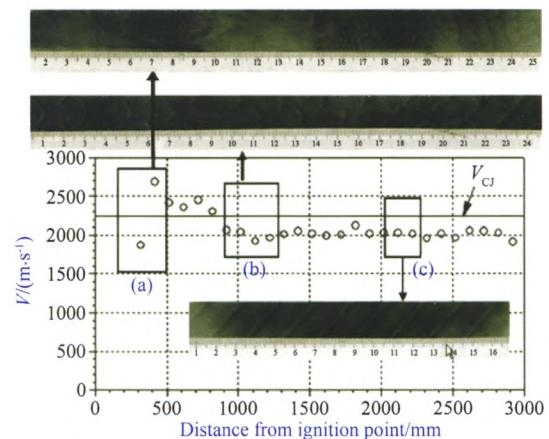


图8 爆震波速度沿管长的变化和烟迹结构( $H_2/O_2 = 1/1$ , 压力  $p = 13\text{kPa}$ , 管径  $d = 6\text{mm}$ )<sup>[50]</sup>

Fig. 8 Variation of detonation velocity along with tube length and soot patterns ( $H_2/O_2 = 1/1$ ,  $p = 13\text{kPa}$ ,  $d = 6\text{mm}$ )<sup>[50]</sup>

起爆(Re-initiation)<sup>[46]</sup>,速度再次增加,可能经过若干循环后衰减<sup>[25, 51]</sup>。从稳定性上来讲,结巴爆震更接近于螺旋爆震,其胞格结构也与螺旋爆震有相似之处<sup>[46]</sup>。

在较大尺度下,Lee<sup>[52]</sup>和Ishii<sup>[46]</sup>都对多种稳定和不稳定可爆混合物的爆震形式进行了总结和归类。他们的部分结果见表 1~3。可见,结巴爆震和驰震

表1 不同的近极限燃烧形式分类<sup>[52]</sup>

Table 1 Classification of the different types of near-limit behavior<sup>[52]</sup>

Mode	Name	Brief description
1	Stable	$V_{CJ}$ within 3%
2	Rapid fluctuations	$\approx 0.7V_{CJ}$ to $\sim 0.9V_{CJ}$
3	Stuttering	$0.6V_{CJ}$ to $\sim V_{CJ}$
4	Galloping waves	$0.4V_{CJ}$ to $\sim 1.5V_{CJ}$
5	Low-velocity stable	$0.5V_{CJ}$ within 5%
6	Failure	$0.5V_{CJ}$ and no re-initiation

表2 部分不同可爆混合物的详细传播形式(1~6 是表 1 中的燃烧模式序号)<sup>[52]</sup>

Table 2 Part of the evolution of the various modes (from 1 to 6 according to Table 1) with initial pressure  $p$  of the eight tested mixtures<sup>[52]</sup>: I :  $(C_2H_2 + 2.5 O_2) + 75\% Ar$ ; II :  $C_2H_2 + 2.5 (O_2 + 3.76 N_2)$ ; III :  $(C_2H_2 + 5 N_2O) + 50\% Ar$ ; IV :  $C_2H_4 + 3 O_2$ ; V :  $C_2H_6 + 3.5 O_2$ ; VI :  $C_3H_8 + 5 O_2$ ; VII :  $(C_3H_8 + 5 O_2) + 50\% Ar$ ; VIII :  $(C_3H_8 + 5 O_2) + 50\% N_2$

Modes $p/\text{Torr}$	Tested mixtures							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
150							1	2
80	1	2						2
50	2	2	1	1	1	1	2	2
40	2	2	1,2					
30		2,6	2				2	2
24		2,5,6						2,6
15	2,6		2,3					
12	2,6			2	2,3	2,3	2	
10	2,6		2,6	2,4	3,4	2,3,4		
6				2	6	4		

表3 部分不同可爆混合物的传播模式<sup>[46]</sup>

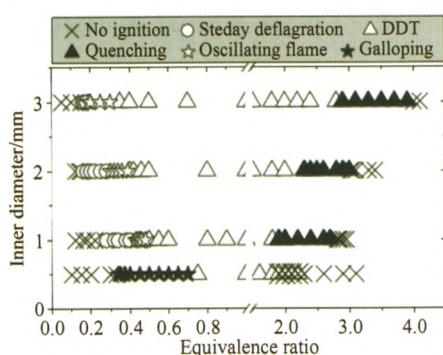
Table 3 Part of the propagation modes in different mixtures by Ishii<sup>[46]</sup>: 1.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ; 2.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ ; 3.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{N}_2$ ; 4.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{N}_2$ ; C, Compression wave resulting in no re-initiation; F, Failure; St, Stuttering; Ga, Galloping; and S, Stable

$p$ /mbar	Mixtures			
	1	2	3	4
100			S	
80			C, Ga	
70			C, F	
50	S	S	F	
30	S	S	F, St	
25	Ga	F	F	
20	C, Ga	F	F	
15	F	F		

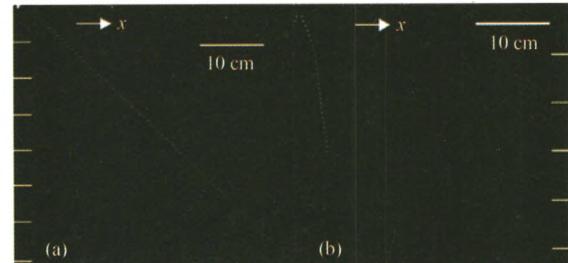
爆震大多出现在不稳定可爆混合物的近极限状态<sup>[25]</sup>。小尺度的实验同样可以证明这一点。Manzhalei 在内径  $d = 0.6, 2, 1, 5$ <sup>[53]</sup> 和  $1\text{mm}$ <sup>[54]</sup> 的光滑管内得到了与大尺度实验类似的传播模式(见表4)。Camargo 等人<sup>[33]</sup>则通过实验证明, 驰震爆震可以由螺旋爆震衰减形成。然而, 对于“低速爆震”以及更低速度的传播模式, 由于缺少大量实验证, 尚不能准确地确定其能在何种情况下出现, 甚至在速度区分上都有不同定义(Lee 认为低速爆震的速度约为一半的 C-J 爆震速度<sup>[25]</sup>)。如果再加上微细管道几何形状的影响(比如爆震波在细环形管道<sup>[32]</sup>、含障碍物管道<sup>[55]</sup>或细平面间隙<sup>[56-59]</sup>内传播), 则其规律更难以掌握。

表4 微细管内的传播模式<sup>[53]</sup>Table 4 Propagation modes in capillaries<sup>[53]</sup>

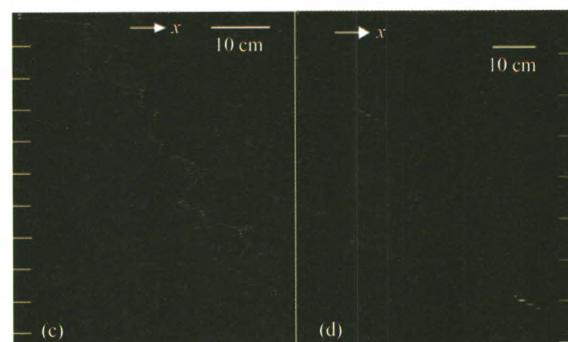
Modes	0.6 mm I.D.	2.1 mm I.D.	5 mm I.D.
Range of initial pressure/atm			
Quenching	<0.05	<0.016	-
Low velocity	0.05~0.11	0.016~0.028	not observed
Galloping detonation	0.11~0.16	0.028~0.04	not observed
Spinning and multiple-front detonation	>0.15	>0.04	-

图9 不同当量比和管径下的火焰传播模式<sup>[36]</sup>Fig. 9 Effects of tube diameter and equivalence ratio on the propagation mode<sup>[36]</sup>

值得一提的是,除了 C-J 爆震, Wu 等人<sup>[36]</sup>在静止点火条件下的光滑微细管道内还获得了包括驰震爆震在内的多种火焰传播模式(见图 9~10)。这一发现超越了近极限爆震通常都以预爆管的方式或在大尺度管内进行的范畴,也打破了微尺度爆燃燃烧和爆震燃烧的边界,给微燃烧研究领域提供了更多的研究内容。



(a)  $d = 1\text{mm}, \Phi = 0.35$ , steady deflagration wave propagation  
(b)  $d = 1\text{mm}, \Phi = 2$ , quenching flame



(c)  $d = 2\text{mm}, \Phi = 0.35$ , oscillating flame mode  
(d)  $d = 0.5\text{mm}, \Phi = 0.35$ , galloping mode

图10 几种微细管道内的不同火焰传播模式<sup>[36]</sup>Fig. 10 Different flame propagation modes in micro-tubes<sup>[36]</sup>

### 3 微爆震研究的几个重要问题

#### 3.1 影响爆震的因素

从上文可以看出,爆震燃烧的现象是十分多样和复杂的,这是因为影响燃烧的因素很多,只要其中一个或若干个稍作改变,都很有可能得到完全不同的结果,这直接导致了爆震燃烧的基础理论难以完善、规律难以掌握。

总的来看,燃料种类、管道尺寸、初始条件(如压力、温度、点火能量等)、壁面条件这 4 方面是影响爆震的主要因素,而且,它们之间还互相依赖,并不独立影响燃烧。

##### 3.1.1 爆震极限判定准则

具体地说,任何燃料的爆震都与其胞格尺寸  $\lambda$  有关,当管径接近  $\lambda$  时,爆震就会不稳定,这种不稳定体现在爆震波速度的波动和相对于 C-J 爆震波速度的损失。Manson 等人<sup>[60]</sup>最早提出爆震极限与爆震波的稳

定性有关,他们认为驰震爆震是可自持传播的不稳定爆震的最低形态,因为驰震爆震的爆震波解耦、二次起爆过程会持续几个周期,通常一个周期长度约为几百倍的管径。Moen 等人<sup>[61]</sup>则认为螺旋爆震的出现可以成为定义爆震极限的准则,Lee<sup>[62]</sup>在此基础上进一步提出  $\lambda=\pi d$  是爆震极限的准则(也称  $\lambda/3$  准则<sup>[63]</sup>)。

总体上来讲,很多实验证明<sup>[50, 64-65]</sup>,  $\lambda/3$  准则具有较广的适用性,在微细管道内也同样如此<sup>[64-66]</sup>,也就是说,Manson 等人<sup>[60]</sup>提出的以驰震爆震的出现为判定爆震极限依据的论断不太合适,因为驰震爆震无论在大尺度还是小尺度的爆震中都不常见,且难以确定其在何种情况下能够出现。Gao 等人<sup>[67]</sup>甚至没获得在微细管道内的稳定可爆混合物的驰震爆震。但是,  $\lambda/3$  准则也有一些不足,Camargo 等人<sup>[33]</sup>通过实验发现,该准则对不稳定可爆混合物的适用性稍差,它目前只对出现稳定螺旋爆震的极限情况预测较好(即支持 Moen<sup>[61]</sup>的观点)。

值得一提的是,“ $\lambda/3$  准则”的  $\lambda$  本身也受初始压力和温度等条件影响。有实验发现,随着管径  $d$  的减小,初始临界压力会提高<sup>[64]</sup>,进而减小  $\lambda$ <sup>[65]</sup>;也有实验发现,初始温度的提高会增大  $\lambda$ ,进而减弱混合物的可爆性<sup>[68-69]</sup>,在此情况下,判定爆震极限的难度就大大增加了。

### 3.1.2 边界条件

边界条件对爆震的影响也十分复杂,但总体来讲,如上文提到的,稳定可爆混合物的爆震受边界条件影响较大,不稳定可爆混合物还受自身爆震波锋面不稳定的影响<sup>[33]</sup>。Starr 等人<sup>[55]</sup>研究了  $d=12.7$  和  $50.8\text{mm}$  管径的爆震极限,发现粗糙壁面下的爆震极限比光滑壁面的宽,这意味着由粗糙度引起的湍流对爆震波的传播起到了增益作用,同时测得了失效速度约为  $0.4V_{\text{CJ}}$ 。对于非圆形边界,Ishii 等人<sup>[59]</sup>研究了不同当量比的爆震波在平面缝隙内的速度损失,发现低当量比的混合物更容易在细管道内传播,其速度损失  $\Delta V \propto H^{0.8}$ ,其中  $H$  是缝隙的高度。国内的张超等人<sup>[58]</sup>也进行了相似的实验。Wu 等人<sup>[70]</sup>研究了一个微细突扩管道内的近极限爆震现象,发现了爆震波经过突扩段之后的二次起爆。

## 3.2 火焰加速和 DDT 过程

爆燃和爆震虽然是 2 种不同的燃烧方式,但在很多情况下两者可以相互转变。为了更好地利用爆震燃烧的优势,人们一直都在尝试用最有效的方法获得爆震波。DDT 起爆由于不需要很高的点火能量,是现在最常见于爆震发动机的起爆方式<sup>[22]</sup>。关于 DDT 的研

究非常多<sup>[71, 72]</sup>,归纳起来,人们关注的问题无非是:何时、何处以及如何形成 DDT<sup>[71]</sup>。

### 3.2.1 DDT 距离——何时、何处形成爆震

对于爆震发动机来说,DDT 的形成越快越好,除了常见的设置障碍物、提高压力等手段外,减小尺寸也有利于缩短 DDT 距离。图 11 对比了 Wu<sup>[36]</sup> 和何建男<sup>[37]</sup>在不同管径下测得的火焰速度,可以看出,爆震波在小管径内达到 C-J 爆震的时间明显更小,意味着 DDT 距离更短。这一效果也是进行微爆震研究的主要动力。何建男等人<sup>[73]</sup>还给出了更清楚的 DDT 距离随管径的变化(见图 12),但是并未作进一步分析,迄今为止,这方面的研究仍然不足。

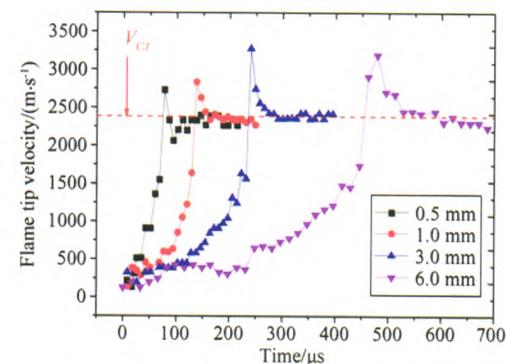


图 11 不同管径下的火焰传播速度对比<sup>[36-37]</sup>  
Fig. 11 Flame propagation velocities under different scales<sup>[36-37]</sup>

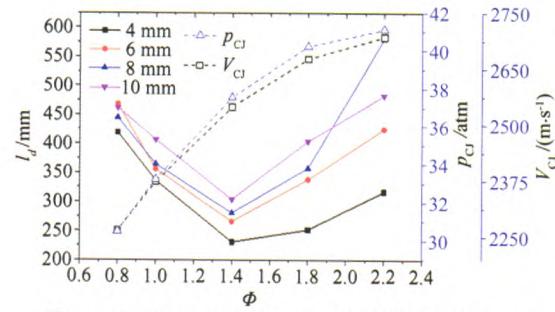


图 12 不同管径下 DDT 距离  $l_d$ 、C-J 爆震压力和 C-J 爆震速度随当量比的变化<sup>[73]</sup>  
Fig. 12 Evolution of DDT distance, C-J pressure and C-J velocity with equivalence ratio under different tube diameters<sup>[73]</sup>

当然,参考前文的论述,影响 DDT 距离的因素不只有尺寸一个。实际上,早在上世纪 60 年代,Bollinger 等人<sup>[74]</sup>就已经测量了不同压力和温度下、多种可爆混合物的 DDT 距离,并提出了预测 DDT 距离的经验公式,但是由于缺少完整的理论分析,有时并不准确;Dorofeev<sup>[75]</sup>根据火焰面积、湍流燃烧速率和火焰传播速度的关系,提出了光滑管道和带障碍物管道内的 DDT 预测公式,但是他并没有研究小尺寸管道是否适用。对于微爆震,何建男等人<sup>[37, 73]</sup>发现当量比  $\Phi$  与 DDT 距离  $l_d$  的关系呈 U 形曲线,类似的 U 形曲线也体现在  $\Phi$  与直接起爆的临界点火能量<sup>[76]</sup>和  $\Phi$  与胞格

尺寸 $\lambda$ 的关系上<sup>[26]</sup>。由于 $\lambda$ 是爆震波的特征参数,而它与 $l_d$ 之间是否存在某种对应关系,是值得研究的地方。

值得一提的是,DDT距离也可以用烟膜法测量,但是Wen等人<sup>[77]</sup>发现,烟膜的厚度会影响DDT,即使在大尺度管内也如此。

### 3.2.2 DDT 的形成原因

对于DDT的形成,Urtiew等人<sup>[78]</sup>观察到了2种情况,有时DDT发生在湍流火焰区,有时发生在前导激波和火焰之间的预热区(Preheated Zone)。Oran<sup>[71]</sup>认为湍流火焰可以加强穿过它的激波并产生新的激波,而后者又可以反过来加强湍流,这种激波和火焰的相互作用能够在未反应混合物中产生局部点火,称为“热点”(Hot Spots),根据Zeldovich<sup>[79-80]</sup>的梯度理论,这些热点最终能够引发爆震。Markstein<sup>[81]</sup>通过实验证实了激波对火焰湍流度的增强作用,但是他的激波并不是跟火焰在同一方向起始。Liberman等人<sup>[82-83]</sup>则更支持预热区的作用,他们认为DDT的形成完全决定于管道内的火焰加速。他们的数值模拟和实验均表明,火焰要经过3个阶段的加速过程:(1)火焰点火,呈指数倍加速,并在距火焰面较远处产生激波;(2)火焰加速度减小,在火焰锋面直接形成激波;(3)火焰最终加速成为爆震。其中在第二阶段,火焰前端的未反应物被压缩、加热(形成预热区),压力快速升高,导致反应率再次增强,当激波与火焰面耦合后,产生过驱爆震。图13(a)~(c)展示了三个阶段火焰加速的全过程,可以看到火焰在不同加速阶段,其形状也不同。在第一阶段,火焰呈“指尖形”加速传播;在第二阶段,火焰锋面发生弯曲、凹陷,并在前方形成“预热区”;而在

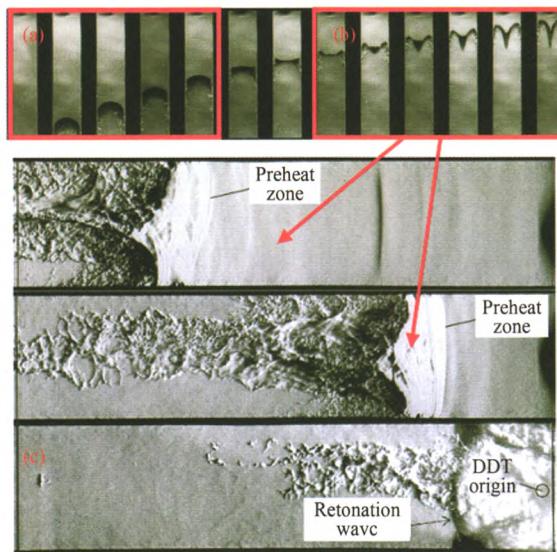


图13 Liberman拍摄到的DDT三阶段加速过程<sup>[83]</sup>  
Fig.13 Three acceleration stages of DDT process captured by Liberman<sup>[83]</sup>

第三阶段,火焰面与激波耦合,形成爆震。

实际上,火焰在形成爆震前所经历的加速过程已经被一些学者研究过<sup>[84-90]</sup>,上文的第三阶段除了包含最终的爆震形成之外,在之前还有一段火焰加速到C-J爆燃速度的过程,即整个DDT过程总共可以分成4个不同阶段的速度变化。这一特点除了被数值分析所证实外<sup>[85, 88]</sup>,也被何建男等人<sup>[37]</sup>在微爆震实验中观察到。虽然这方面内容在实验和数值分析上都缺少足够的研究,但是有一些结论已被初步了解,比如,第一阶段的火焰加速受粘性应力的影响较小;第二阶段火焰会出现弯曲<sup>[82-84, 89, 91]</sup>,被称为“郁金香形”火焰(Tulip Flame)<sup>[92]</sup>;第三阶段的加速较复杂,壁面的粘性加热作用不可忽视<sup>[86, 88, 90]</sup>等。综合来看,在最终形成爆震前,第二、三阶段的影响是至关重要的,不论是“热点”还是“预热区”,都有可能加速爆震的形成,而通过目前的数值分析来看,在小尺寸管道内,气体在第二、三阶段的预压缩、遇到的水力阻力而产生的高压和强激波可能是爆震形成的主要原因<sup>[87-88, 93-94]</sup>,这也间接支持了“预热区”的解释。Ivanov等人<sup>[93-94]</sup>甚至模拟得出,当管径尺寸降到1 mm以下时,火焰可以直接指数加速至爆震,没有第二阶段的减速过程(见图14)。这一结论还需要通过实验来验证。

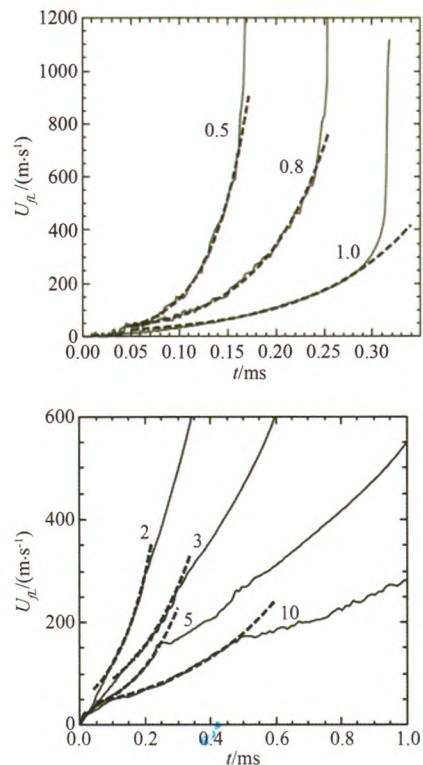


图14 Ivanov模拟的 $d=0.5\sim10$  mm管径的火焰加速过程<sup>[94]</sup>  
Fig.14 Flame velocity-time dependence for the channels of  $d=0.5\sim10$  mm by Ivanov<sup>[94]</sup>

在中、大尺度的爆震管中,常使用障碍物来加速

DDT 形成,虽然现在还没有文献报道在微爆震中使用障碍物或其它方法(比如增加壁面粗糙度),但也是值得尝试的。Ciccarelli 等人<sup>[72]</sup>总结了光滑管和带障碍物管道形成 DDT 的准则:分别是  $d \geq \lambda/\pi$  和  $d' \geq \lambda$ ,其中  $d'$  是带障碍物管中没有阻碍处的横截面直径。该准则对于微爆震的适用性还有待于检验。

### 3.3 微爆震推进性能评估

任何动力系统都需要经过性能评估才可以判定其是否有应用价值。微爆震作为一种新概念动力方式,与其它推进装置相比是否有具有优势,还需要大量研究来证明,包括对其燃烧效率、循环效率和推进性能方面进行评估。由于常规爆震的性能模型尚不完善,以上研究的开展更加艰巨。

何建男等人<sup>[73]</sup>率先用悬摆法测量了内径为 4~10 mm 的单次微爆震比冲。他们采用了 Wintenberger 等人<sup>[95]</sup>的直接起爆计算模型,发现如果不计 DDT 过程对冲量的影响,该模型估算的比冲与实验值吻合较好。他们也与 Cooper 等人<sup>[96]</sup>在大尺度、无障碍物的管内测得的比冲作了比较,发现微爆震的比冲不比大尺度的高,但是这其中 DDT、长径比、工况等诸多因素的影响,而且考虑到何建男等人的测量系统有阻力,其真实的比冲应该更大。在他们的工况下,化学恰当比的乙烯-氧气混合物在 4~10 mm 内径、1 m 长的光滑管内单次爆震产生的比冲至少为 90~130 s。

DDT 可能是对微爆震比冲造成最严重影响的因素之一。在何建男等人<sup>[73]</sup>的实验中,DDT 距离约占整个管长的 20%~60%(光滑管内),而 DDT 过程中的火焰加速产生的冲量十分小,如果能够缩短 DDT 距离,系统的比冲会大大提升。在大尺度爆震中,人们通常用障碍物来缩短 DDT,但是其比冲由于损失的增加反而有可能比不加障碍物的低。因此,如何在微细管内有效缩短 DDT 距离,是提高微爆震推进性能的关键。

对于微细管道内爆燃火焰产生的推力和比冲,Gamezo 等人<sup>[97]</sup>进行了模拟。他们发现,在  $d \approx 0.1 \sim 1.2$  mm 的极细管道内,管径越小,推力越大;当管径约为层流火焰反应区厚度的 5 倍时,推力是最大的。他同时定义了 2 种比冲:一是基于喷射出管道的气体质量,一是基于已燃气体的质量,发现前者随管径的减小而增加,后者相反。虽然他们的管道尺寸过于短小,而且仅仅模拟了爆燃火焰的加速过程,但是这一结果依然具有参考意义,因为它证明细管道的火焰不但加速更快(3.2 节的文献已说明这一点),甚至推力也更大。由于 DDT 过程的火焰是爆燃的,能否通过进一步减小 DDT 过程的管径来加速爆震、增加推力,也比较有研

究意义。

此外,管径、管长等也是决定比冲的关键因素,它们或单独、或相互地影响系统性能,使复杂程度大大增加。总之,对微爆震比冲的评估还需要大量的实验数据,何建男<sup>[73]</sup>和 Cooper<sup>[96]</sup>的工况有所不同,简单的对比也是很有局限性的。

关于微爆震的循环模型的建立可以参考传统爆震发动机的模型<sup>[98-99]</sup>,其中重要的一方面就是评估损失的影响。除了常规爆震中需要考虑的障碍物、燃烧不充分等带来的损失,微爆震推进器还要考虑体积减小、面容比增加对系统熵增的影响。Li 等人<sup>[100]</sup>通过对圆管内的火焰传播进行理论分析发现,当管的半径小于 10 倍火焰厚度时,系统的单位体积热损失会极大地增加。但是与常规爆震相比,由于面容比增加导致的损失会多大程度地影响微爆震的推进性能,还需要进一步探索。

### 3.4 微爆震动力系统

随着 MEMS 概念的兴起,大量新颖的微推进器被人们设计出来<sup>[13-14, 101-102]</sup>,但是基于微爆震的推进器在文献中还很少见。McManus 等人<sup>[103]</sup>较早提出了基于 MEMS 的小尺度 PDE 概念,尽管他们的爆震管尺寸按照本文的定义属于大尺度,但是他们的实验证明 PDE 的最大推力比相同尺寸的冲压发动机大一倍,而单位推力的耗油率比后者低将近一倍。

目前唯一对微爆震推进器进行实质探索的是 Wu 等人<sup>[104]</sup>。他们采用低温共烧陶瓷(Low Temperature Cofired Ceramic,简称 LTCC)制作了 1mm×0.6mm×100mm 的微爆震推进器(见图 15)。在 100 Hz 的频率下,单次脉冲的冲量约为 12 μN·s,比冲是 10s。他们

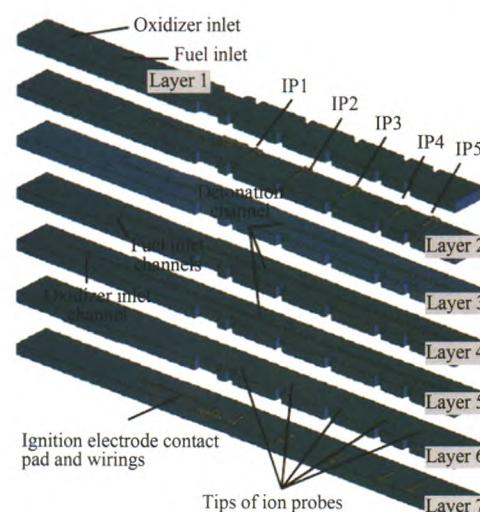


图 15 Wu 的 LTCC 微爆震推进器爆炸视图<sup>[104]</sup>

Fig. 15 Exploded view of the LTCC layers of the pulsed detonation micro-thruster<sup>[104]</sup>

的成果证明,把微爆震用于动力推进领域是可能的。然而也可看出,该推进器的推进性能还不理想,这可能是由于管道尺寸小,工作频率高,气体填充、混合不好,导致燃烧不充分,DDT 距离过长。从图 16 中可以看到,混合物在推进器尾端才形成爆震,而且不同脉冲爆震循环的火焰亮度差别较大,说明爆震不是很稳定。

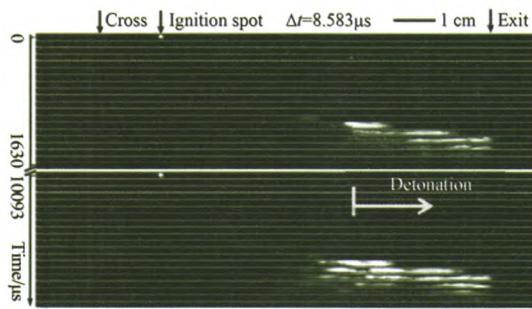


图 16 2 个相邻脉冲爆震循环的高速火焰传播图<sup>[104]</sup>  
Fig. 16 High-speed visualizations of reaction propagation in two successive pulsed detonation cycles<sup>[104]</sup>

Wu 的尝试反映出了制造微爆震推进器的一些问题,关键是要解决可爆混合物在微尺度空间内的供给、填充、稳定工作和短距起爆问题,同时,还要兼顾推进器的强度、能量损失等方面,这给其设计、制造提出了较高的要求。

## 4 结 论

微爆震燃烧是一个较新的研究课题,本文基于近几十年兴起的微燃烧和微动力机电系统研究提出这一概念,旨在把爆震燃烧用于微动力领域,以解决人们对小型、高效动力的需求。

几十年来,人们在近极限爆震研究中已经发现了与微爆震有关的现象,但是对其复杂的成因和影响因素,还没有研究透彻,比如火焰传播模式在何种条件下发生、DDT 形成条件、如何缩短 DDT 等。这些问题不但是微爆震推进器设计的基本问题,也涉及爆震燃烧的安全问题,在工程应用上是极具参考价值的。

如果把微爆震应用于动力系统,人们还需完善爆震性能计算模型。常规爆震的模型虽然可以作为参考,但对于微爆震还需要考虑损失。微爆震推进器的设计应该建立于对爆震波传播和发展规律有一定把握的基础上,这一点还需人们进行大量的实验和数值模拟研究。

总之,微爆震无论在机理还是工程应用上都具有较高的研究价值,很多重要难题还需要研究者进行不断探索。

## 参考文献:

- [1] Ju Y, Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715.
- [2] Fernandez-Pello A C. Micropower generation using combustion: issues and approaches[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883-899.
- [3] Kang K, Meng Y S, Bréger J, et al. Electrodes with high power and high capacity for rechargeable lithium batteries[J]. Science, 2006, 311(5763): 977-980.
- [4] Cook-Chennault K, Thambi N, Sastry A. Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(4): 043001.
- [5] Dunn-Rankin D, Leal E M, Walther D C. Personal power systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(5): 422-465.
- [6] Chou S, Yang W, Chua K, et al. Development of micro power generators – a review[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 1-16.
- [7] Vican J, Gajdeczko B, Dryer F, et al. Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29 (1): 909-916.
- [8] Sitzki L, Borer K, Schuster E, et al. Combustion in microscale heat-recirculating burners[R]. AIAA-2001-1087.
- [9] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y-S. Combustors for micro-gas turbine engines[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(1): 109-117.
- [10] Epstein A H, Senturia S D, Ayon A, et al. Power MEMS and micro-engines[C]//International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997 TRANSDUCERS97, Chicago, Illinois, 1997: 753-756.
- [11] Tanaka S, Hikichi K, Togo S, et al. World's smallest gas turbine establishing Brayton cycle [C]//The 7th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (Power Mems 2007), 2007: 359-362.
- [12] Wu M H, Yetter R A, Yang V. Development and characterization of ceramic micro chemical propulsion and combustion systems[R]. AIAA-2008-966.
- [13] Wu M H, Yetter R A. A novel electrolytic ignition monopropellant microthruster based on low temperature co-fired ceramic tape technology[J]. Lab on a Chip, 2009, 9(7): 910-916.
- [14] Wu M H, Lin P S. Design, fabrication and characterization of a low-temperature co-fired ceramic gaseous bi-propellant micro-thruster[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(8): 085026.
- [15] Kawamura Y, Ogura N, Yamamoto T, et al. A miniaturized methanol reformer with Si-based microreactor for a small PEM-FC[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(4): 1092-1101.
- [16] Ryi S K, Park J S, Choi SH, et al. Novel micro fuel processor for PEMFCs with heat generation by catalytic combustion[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 113(1): 47-53.
- [17] Lerou J, Tonkovich A, Silva L, et al. Microchannel reactor architecture enables greener processes[J]. Chemical Engineering

- Science, 2010, 65(1): 380-385.
- [18] Durisch W, Bitnar B, Mayor J-C, et al. Small self-powered grid-connected thermophotovoltaic prototype system[J]. Applied Energy, 2003, 74(1): 149-157.
- [19] Fraas L, Samaras J, Huang H, et al. TPV generators using the radiant tube burner configuration[C]//Proceedings of 17th European PV Solar Energy Conference, Munich, Germany, 2001: 26.
- [20] Nielsen O M, Arana L R, Baertsch C D, et al. A thermophotovoltaic micro-generator for portable power applications [C]// 12th International Conference on TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, Massachusetts, USA, 2003: 714-717.
- [21] Chigier N, Gemci T. A review of micro propulsion technology [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2003: 6-9.
- [22] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [23] Roy G, Frolov S, Borisov A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(6): 545-672.
- [24] Yetter R A, Yang V, Wu M H, et al. Combustion issues and approaches for chemical microthrusters[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2007, 6 (4): 393-424.
- [25] Lee J H. The detonation phenomenon[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [26] Kaneshige M, Shepherd J E. Detonation database[R]. GALCIT Technical Report FM97-8, 1997.
- [27] Kailasanath K. Review of propulsion applications of detonation waves[J]. AIAA Journal, 2000, 38(9): 1698-1708.
- [28] Zipf R K, Gamezo V N, Mohamed K M, et al. Deflagration-to-detonation transition in natural gas - air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(8): 2165-2176.
- [29] Maruta K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125-150.
- [30] Li J, Chou S, Li Z, et al. A comparative study of H<sub>2</sub>-air premixed flame in micro combustors with different physical and boundary conditions[J]. Combustion Theory and Modelling, 2008, 12(2): 325-347.
- [31] Walther D C, Ahn J. Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(5): 583-610.
- [32] Chao J, Ng H, Lee J. Detonability limits in thin annular channels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2349-2354.
- [33] Camargo A, Ng H D, Chao J, et al. Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes[J]. Shock Waves, 2010, 20(6): 499-508.
- [34] Fonbershtein E, Ékomasov S. Detonation of gasoline—Air mixtures in small-diameter tubes[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1978, 14(3): 393-394.
- [35] Wu M H, Burke M, Son S, et al. Flame acceleration and the transition to detonation of stoichiometric ethylene/oxygen in microscale tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2429-2436.
- [36] Wu M H, Wang C Y. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2287-2293.
- [37] 何建男, 范玮, 肖强, 等. 六毫米内径管道中的单次爆震实验研究[J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1722-1728.
- He Jiannan, Fan Wei, Xiao Qiang, et al. Experimental research on single-cycle detonation in tubes with an inner diameter of 6 millimeters[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(12): 1722-1758.
- [38] Wu M H, Kuo W C. Transition to detonation of an expanding flame ring in a sub-millimeter gap[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(3): 1366-1368.
- [39] Wu M H, Kuo W C. Accelerative expansion and DDT of stoichiometric ethylene/oxygen flame rings in micro-gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2017-2024.
- [40] Campbell C, Woodhead D W. The ignition of gases by an explosion-wave I: Carbon monoxide and hydrogen mixtures[J]. Journal of the Chemical Society, 1926, 129: 3010-3021.
- [41] Campbell C, Woodhead D W. Striated photographic records of explosion-waves[J]. Journal of the Chemical Society, 1927, 130: 1572-1578.
- [42] Schott G L. Observations of the structure of spinning detonation [J]. Physics of Fluids (1958-1988), 1965, 8(5): 850-865.
- [43] Denisov Y N, Troshin Y K. On the mechanism of detonative combustion[C]//Eighth Symposium (International) on Combustion, 1961: 600-610.
- [44] Voitsekhovskii B, Mitrofanov V V, Topchiyan M. Structure of the detonation front in gases (survey)[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1969, 5(3): 267-273.
- [45] Duff R E. Investigation of spinning detonation and detonation stability[J]. Physics of Fluids (1958-1988), 1961, 4(11): 1427-1433.
- [46] Ishii K, Grönig H. Behavior of detonation waves at low pressures[J]. Shock Waves, 1998, 8(1): 55-61.
- [47] Achasov O, Penyazkov O. Dynamics study of detonation-wave cellular structure 1. Statistical properties of detonation wave front[J]. Shock Waves, 2002, 11(4): 297-308.
- [48] Manzhalei V, Mitrofanov V. The stability of detonation shock waves with a spinning configuration[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1973, 9(5): 614-620.
- [49] Manzhalei V, Subbotin V. Stability of an overcompressed gas detonation[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1976, 12(6): 819-825.
- [50] Kitano S, Fukao M, Susa A, et al. Spinning detonation and velocity deficit in small diameter tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2355-2362.
- [51] Ul'yanitskii V Y. Galloping mode in a gas detonation[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1981, 17(1): 93-97.

- [52] Lee J, Dupré G, Knystautas R, et al. Doppler interferometry study of unstable detonations[J]. Shock Waves, 1995, 5(3): 175-181.
- [53] Manzhalei V. Detonation regimes of gases in capillaries[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1992, 28(3): 296-302.
- [54] Manzhalei V. Low-velocity detonation limits of gaseous mixtures[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1999, 35(3): 296-302.
- [55] Starr A, Lee J H, Ng H D. Detonation limits in rough walled tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1989-1996.
- [56] Ishii K, Monwar M. Detonation propagation with velocity deficits in narrow channels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2359-2366.
- [57] Manzhalei V. Gas detonation in a flat channel of 50- $\mu\text{m}$  depth [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1998, 34(6): 662-664.
- [58] 张超, 唐豪, 李明. 当量比和间隙尺寸对爆震波传播过程的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1948-1957.  
Zhang Chao, Tang Hao, Li Ming. Effects of equivalence ratio and gap size on the propagation behavior of detonations[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1948-1957.
- [59] Ishii K, Itoh K, Tsuboi T. A study on velocity deficits of detonation waves in narrow gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2789-2794.
- [60] Manson N, Brochet C, Brossard J, et al. Vibratory phenomena and instability of self-sustained detonations in gases[C]//Ninth Symposium (International) on Combustion, 1963: 461-469.
- [61] Moen I, Sulmistras A, Thomas G, et al. Influence of cellular regularity on the behavior of gaseous detonations[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1986, 106: 220-243.
- [62] Lee J H. Dynamic parameters of gaseous detonations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16(1): 311-336.
- [63] Nettleton M A. Gaseous detonations: their nature, effects and control[M]. Springer Science & Business Media, 1987.
- [64] Gao Y, Ng H, Lee J. Minimum tube diameters for steady propagation of gaseous detonations[J]. Shock Waves, 2014, 24(4): 447-454.
- [65] Fischer J, Liebner C, Hieronymus H, et al. Maximum safe diameters of microcapillaries for a stoichiometric ethene/oxygen mixture[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(12): 2951-2956.
- [66] Liebner C, Fischer J, Heinrich S, et al. Are micro reactors inherently safe? An investigation of gas phase explosion propagation limits on ethene mixtures[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2012, 90(2): 77-82.
- [67] Gao Y, Lee J H, Ng H D. Velocity fluctuation near the detonation limits[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(11): 2982-2990.
- [68] Auffret Y, Desbordes D, Presles H. Detonation structure of  $\text{C}_2\text{H}_4\text{-O}_2\text{-Ar}$  mixtures at elevated initial temperature[J]. Shock Waves, 1999, 9(2): 107-111.
- [69] Auffret Y, Desbordes D, Presles H. Detonation structure and detonability of  $\text{C}_2\text{H}_2\text{-O}_2$  mixtures at elevated initial temperature [J]. Shock Waves, 2001, 11(2): 89-96.
- [70] Wu M H, Kuo W C. Transmission of near-limit detonation wave through a planar sudden expansion in a narrow channel [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(11): 3414-3422.
- [71] Oran E S, Gamezo V N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion[J]. Combustion and Flame, 2007, 148(1): 4-47.
- [72] Ciccarelli G, Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 499-550.
- [73] 何建男, 范伟, 马鹏飞, 等. 悬摆法测量微尺度光滑管内爆震冲量的实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(2): 393-400.  
He Jiannan, Fan Wei, Ma Pengfei, et al. Experimental research on detonation impulse measurements in micro-scale smooth tubes using a ballistic pendulum[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(2): 393-400.
- [74] Bollinger L E. Experimental measurements and theoretical analysis of detonation induction distances[J]. ARS Journal, 1961, 31(5): 588-595.
- [75] Dorofeev S. Hydrogen flames in tubes: Critical run-up distances [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 5832-5837.
- [76] Zhang B, Bai C. Methods to predict the critical energy of direct detonation initiation in gaseous hydrocarbon fuels - An overview[J]. Fuel, 2014, 117(Part A): 294-308.
- [77] Wen C, Chung K, Hsu Y, et al. Smoked Foil on Deflagration-to-Detonation Transition[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 31(3): 967-970.
- [78] Urtiew P, Oppenheim A. Experimental observations of the transition to detonation in an explosive gas[C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1966: 13-28.
- [79] Zel'dovich Y B, Librovich V, Makhviladze G, et al. On the onset of detonation in a nonuniformly heated gas[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1970, 11(2): 264-270.
- [80] Bradley D, Lawes M, Liu K. Turbulent flame speeds in ducts and the deflagration/detonation transition[J]. Combustion and Flame, 2008, 154(1): 96-108.
- [81] Markstein G. Nonsteady Flame Propagation[M]. New York: Macmillan, 1964.
- [82] Liberman M, 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]. Physics Letters A, 2009, 373(5): 501-510.
- [83] Liberman M, Ivanov M, Kiverin A, et al. Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures[J]. Acta Astronautica, 2010, 67(7): 688-701.
- [84] Kagan L, Sivashinsky G. The transition from deflagration to detonation in thin channels[J]. Combustion and Flame, 2003, 134(4): 389-397.
- [85] Akkerman V Y, Bychkov V, Kuznetsov M, et al. Fast flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in smooth and obstructed tubes, channels and slits[C]//8th US National Combustion Meeting, Salt Lake City, Utah, 2013: 970-978.
- [86] Valiev D, Bychkov V, Akkerman V Y, et al. Heating of the fuel mixture due to viscous stress ahead of accelerating flames in

- deflagration-to-detonation transition [J]. Physics Letters A, 2008, 372(27): 4850-4857.
- [87] Valiev D M, Bychkov V, Akkerman V Y, et al. Different stages of flame acceleration from slow burning to Chapman-Jouguet deflagration[J]. Physical Review E, 2009, 80(3): 036317.
- [88] Valiev D, Bychkov V, Akkerman V, et al. Quasi-steady stages in the process of premixed flame acceleration in narrow channels [J]. Physics of Fluids (1994-present), 2013, 25(9): 096101.
- [89] Bychkov V, Akkerman V Y, Fru G, et al. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes [J]. Combustion and Flame, 2007, 150(4): 263-276.
- [90] Bychkov V, Valiev D, Akkerman V Y, et al. Gas compression moderates flame acceleration in deflagration-to-detonation transition[J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184(7-8): 1066-1079.
- [91] Bychkov V, Golberg M, Liberman M, et al. Numerical simulation of curved flames in cylindrical tubes[J]. Combustion Science and Technology, 1997, 129(1-6): 217-242.
- [92] Clanet C, Searby G. On the "tulip flame" phenomenon[J]. Combustion and Flame, 1996, 105(1): 225-238.
- [93] Ivanov M, Kiverin A, Liberman M. Hydrogen-oxygen flame acceleration and transition to detonation in channels with no-slip walls for a detailed chemical reaction model[J]. Physical Review E, 2011, 83(5): 056313.
- [94] Ivanov M, Kiverin A, Liberman M A. Flame acceleration and DDT of hydrogen - oxygen gaseous mixtures in channels with no-slip walls[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(13): 7714-7727.
- [95] Wittenberger E, Austin J, Cooper M, et al. An analytical model for the impulse of a single-cycle pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(1): 22-38.
- [96] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(5): 1033-1041.
- [97] Gamezo V N, Oran E S. Flame acceleration in narrow channels: applications for micropropulsion in low-gravity environments[J]. AIAA Journal, 2006, 44(2): 329-336.
- [98] Heiser W H, Pratt D T. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(1): 68-76.
- [99] Wintenberger E, Shepherd J. Thermodynamic cycle analysis for propagating detonations[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(3): 694-698.
- [100] Li Z, Chou S, Shu C, et al. Entropy generation during micro-combustion[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(8): 084914.
- [101] Epstein A H. Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 205-226.
- [102] Hussain T, Markides C N, Balachandran R. Flame dynamics in a micro-channelled combustor[C]//Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2010 (ICCMSE-2010), Kos, Greece, 2015: 130-137.
- [103] Mcmanus K, Furlong E, Leyva I, et al. MEMS-based pulse detonation engine for small-scale propulsion applications [M]. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City, Utah. 2001.
- [104] Wu M H, Lu T H. Development of a chemical microthruster based on pulsed detonation[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(10): 105040.

### 作者简介:



何建男(1987-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生。研究方向:微尺度爆震燃烧。通信地址:陕西省西安市碑林区友谊西路西北工业大学209信箱(710072)。E-mail: hjn@mail.nwpu.edu.cn

### (上接第14页)

- [61] Yao W, Wang J, et al. Full-scale detached eddy simulation of kerosene fueled scramjet combustor based on skeletal mechanism[R]. AIAA-2015-3579.
- [62] Franzelli B, Riber E, Sanjosé M, et al. A two-step chemical scheme for kerosene-air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157: 1364-1373.
- [63] Lu T F, Law C K. A directed relation graph method for mechanism reduction[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1333-1341.
- [64] Kee R J, Miller J A. Chemkin-II a fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics [R]. SAND 89-8009B, 1989.
- [65] Lutz A E, Kee R J, Miller J A. A FORTRAN program for predicting homogeneous gas phase chemical kinetics with sensitivity analysis: SANDIA National Laboratories Report[R]. SAND 87-8248, 1990.
- [66] Malo-Molina F J, Gaitonde D V, Ebrahimi H B. Numerical in-

vestigation of a 3-D chemically reacting scramjet engine at high altitudes using JP8-Air mixtures[R]. AIAA-2005-1435.

- [67] Westbrook C K, Dryer F L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames[J]. Combustion Science and Technology, 1981, 27: 31-43.
- [68] Sabelnikov V, Fureby C. Extended LES-PaSR model for simulation of turbulent combustion[J]. Progress in Propulsion Physics, 2013, 4(5): 539-568.

### 作者简介:



何国强(1962-),男,浙江宁波人,教授,博士生导师。研究方向:火箭发动机技术,火箭冲压组合推进技术。通信地址:西安市西北工业大学164信箱(710072)。E-mail: gqhe@mail.nwpu.edu.cn

### (编辑:李金勇)