

小尺寸自适应氢氧脉冲爆轰发动机设计和验证

王春¹, 姜宗林¹

(1 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京, 100190)

摘要: 本文探讨和研究了小尺寸氢氧脉冲爆轰发动机设计方法及其自适应控制原理, 并在实验中进行了验证, 实现了脉冲爆轰发动机的高频连续运行。

关键词: 脉冲爆轰发动机; 自适应控制; 氢燃料

脉冲爆轰发动机是一种新型的航空航天动力推进装置, 具有潜在的应用前景。一般来说, 和传统的喷气推进装置相比, 脉冲爆轰推进具有热效率高、结构简单和比冲大的特点^[1], 在飞行马赫数 0~5 飞行范围内, 脉冲爆轰推进的比冲相对于涡轮喷气推进和亚燃冲压推进要高得多。20 世纪 90 年代以来, 美国 ASI 公司和美国海军研究生院大力推进了脉冲爆轰发动机的概念和工程化研究, 并带动了世界各国的脉冲爆轰发动机研究热潮。目前为止, 脉冲爆轰发动机距实用化和工程化还有相当的距离, 其相关的机理和应用研究还有许多问题需要探讨和探索。

本文的主要目的是探讨一种小尺寸的氢氧火箭模式脉冲爆轰发动机设计方法及其自适应控制原理。相对于一些大尺寸的脉冲爆轰发动机, 小尺寸的脉冲爆轰发动机有着特殊的应用, 如小尺寸脉冲爆轰发动机可以集成于其它类型的发动机如超燃冲压发动机燃烧室中辅助超声速气流中的燃料点火和燃烧等等。小尺寸脉冲爆轰发动机面临的主要技术问题是小尺寸范围内燃料的快速混合以及较短距离内的爆轰快速起爆, 同时脉冲爆轰发动机特殊的脉冲工作方式对于控制技术也提出了新的要求, 典型的例子为脉冲爆轰发动机高频工作方式下, 常规的机械式阀门主动控制方法遇到了限制。

本文的主要研究内容为小尺寸的氢氧火箭模式脉冲爆轰发动机中的燃料快速混合技术、爆轰快速起爆技术和自适应控制原理, 并在实验中验证了上述关键技术, 实现了氢氧脉冲爆轰发动机的高频连续运行。

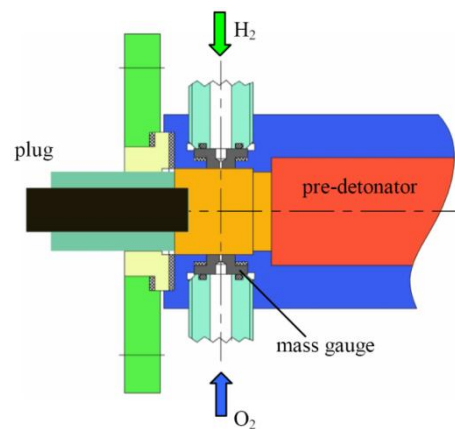
1 燃料快速混合技术

众所周知, 利用爆轰燃烧产生推进能力的基本要求是燃料与氧化剂的快速和充分混合, 在燃料当量比不合适和燃料/氧化剂混合不充分的情况下, 爆轰的起爆困难且产生的爆轰波可能再次解耦和熄爆从而导致脉冲爆轰推进实效。文献[2-3]探讨了爆轰波在传播过程中遇到不可燃惰性气团导致爆轰波解耦的两种机制, 因此, 实现脉冲爆轰发动机的基本工作需要尽可能避免爆轰燃烧室中的极度贫油和富油区域的出现, 这也是保证脉冲爆轰发动机有效推力的关键因素。

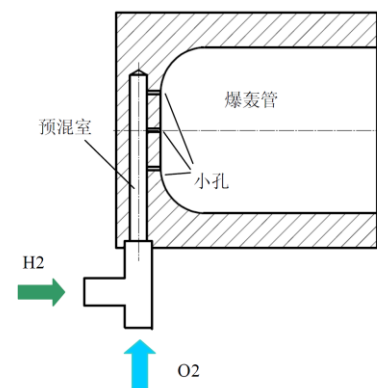
对于采用气相氢氧作为燃料和氧化剂的脉冲爆轰发动机, 我们考虑了两种方式的燃料与氧化剂混合方法, 一是燃料氧化剂对冲混合方法 二是预混腔混合方法, 分别如图 1a 和 b 所示。

燃料/氧化剂对冲混合方式中燃料和氧化剂独立进气, 方便安装特定的时序控制进气, 进气系统相互干扰少, 同时可以防止爆轰燃烧后的回火现象。对冲混合方式主要是用于低频工作的脉冲爆轰发动机的燃料/氧化剂混合, 在高频工作方式下受到限制。

燃料/氧化剂预混腔混合方式中燃料氧化剂混合时间和距离较长, 有利于混合, 可应用于高频工作的脉冲爆轰发动机燃料/氧化剂混合, 燃料氧化剂进气布置。燃料/氧化剂进气布置更具有灵活性, 方便与其它类型发动机集成。其主要的缺点是, 爆轰管回火现象较为严重, 导致部分进气管热负荷, 给管道的密封及安全带来问题; 对于氢氧这一类可燃当量比范围较宽的可燃混合物, 必须避免在预混腔中形成驻定的燃烧, 否则脉冲爆轰发动机不能工作。



(a) 燃料/氧化剂对冲混合

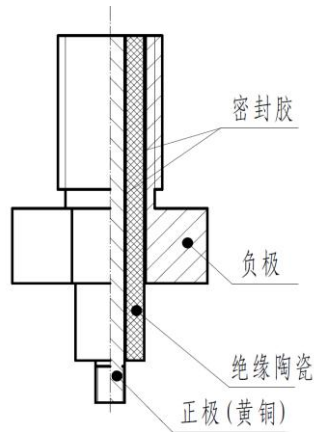


(b) 预混腔混合

图 1 脉冲爆轰发动机快速混合技术

2 爆轰高能起爆技术

我们实验中，采用了中国科学技术大学激波实验室设计的脉冲爆轰点火装置，其点火能量和功率大，并且在多脉冲工作时，电容充放电快，工作可靠。爆轰起爆的点火器使用了两种类型的点火器，一是自行设计的同轴点火器（如图 2a 所示），二是常规的汽车点火器（如图 2b 所示）。自行设计的同轴点火器放电能量大，工艺密封性稍差，常规的汽车点火器更换方便，主要的不足是点火能量稍小，在高压情况下自放电现象比较严重。



(a) 自行研制的同轴点火器



(b) 常规汽车火花塞

图 2 两种类型的爆轰点火器

3 自适应控制技术

脉冲爆轰发动机的运行控制可以采取两种方式，进气和点火时序控制技术和自适应控制技术。进气阀控制通过对燃料、氧化剂和爆轰点火的时序进行准确控制，实现脉冲爆轰发动机的连续工作，其优点是原理简单明了，设计方便；缺点是现有的电磁阀响应时间（特别是阀门关闭时间）一般较长且不稳定，在高频控制下随机性很强，运行状态极不稳定。进气和点火自适应控制在脉冲爆轰发动机运行过程中不控制进气阀门，通过在进气系统中设计随爆轰室反压变化而响应的气动阀，在爆轰起爆后反压升高气动阀暂时封闭，爆轰管下游稀疏波使爆轰室

压力下降后气动阀开启，形成随脉冲爆轰管压力变化而自适应调整的自适应控制，在实验中仅需控制点火时序。进气和点火自适应控制的优点是对控制时序的要求降低，可应用于高频脉冲爆轰发动机工作，主要的缺点是设计前实验状态不确定，需要根据实验情况逐步调整。

无论脉冲爆轰发动机时序控制还是自适应控制中，一个关键的技术是隔离“气塞”技术，即在爆轰燃烧后必须在爆轰管充入一定的隔离不可燃气体，避免上一脉冲循环的爆轰已燃气体对新充入可燃气体形成引燃作用。在采用预混腔混合方式的脉冲爆轰发动机中，避免在预混腔中形成燃料/氧化剂的驻定燃烧是这类脉冲爆轰发动机工作时必须考虑的因素，特别是使用氢/氧可燃范围很宽的可燃气体时。

4 实验结果与讨论

4.1 进气和点火时序控制的低频脉冲爆轰发动机实验结果

自行设计的小尺寸脉冲爆轰发动机模型长度 500mm，内径 26mm，燃料氧化剂分别采用氢气和氧气。

实验状态及参数：调压阀压力 2.1MPa，对应氢气流量 0.5g/s，氧气流量 3.3g/s，当量比 ≈ 1.2 。图 4 显示了爆轰管上两个测点位置的壓力数据，脉冲爆轰发动机运行频率 5Hz。本实验中，燃料/氧化剂采用对冲混合方式，点火器采用自行研制的同轴点火器。爆轰管中的激波运动速度约在 3050m/s，与氢氧爆轰波的 CJ 理论之非常接近，实际获得爆轰波速度与理论值误差能够控制在 7% 以内。

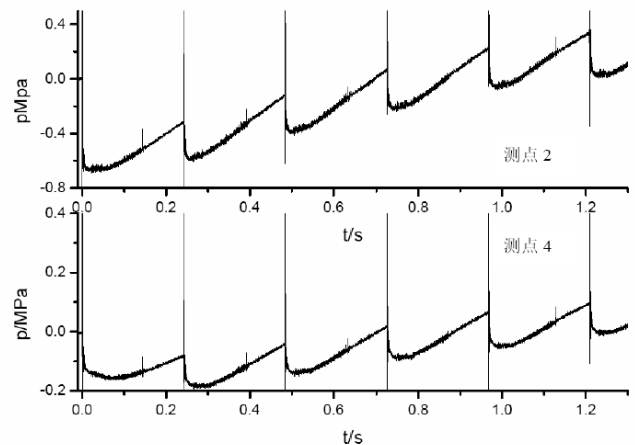


图 4 脉冲爆轰发动机 5Hz 运行

4.2 自适应控制的低频脉冲爆轰发动机实验结果

实验状态及参数：调压阀压力 0.7MPa，对应氢气流量 0.17g/s，氧气流量 1.36g/s，当量比 ≈ 1.0 。图 5 显示了爆轰管上两个测点位置的壓力数据，脉冲爆轰发动机运行频率 30Hz。本实验中，燃料/氧化剂采用预混腔混合方式，点火器采用自行研制的同轴点火器。爆轰管中的激波运动速度约在 1300~1600m/s，主要为未充分发展的爆轰波。图 6 显示了在高频工作状态下的实验照片。

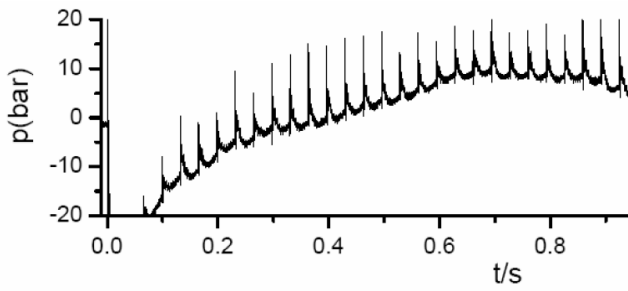


图 5 脉冲爆轰发动机 30Hz 运行



图 6 脉冲爆轰发动机实验照片

5 总结

本文开展了小尺寸脉冲爆轰发动机设计和实验工作,通过采用燃料/氧化剂预混腔混合和自适应控制技术,实现了氢氧脉冲爆轰发动机的高频连续运行。

参考文献

- [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, 科技前沿与学术评论, 作者, 题目, 期刊名, 2001 23(4): 25-31
- [2] 王春, 赵伟, 孙英英, 姜宗林. 爆轰波穿越惰性气团时的透射激波参数分析, 空气动力学报, 2007, 25(3): 330-335.
- [3] 王春, 张德良, 姜宗林. 爆轰波平掠惰性气体界面及其解耦现象的数值研究, 爆炸与冲击, 2006, 26(6): 556-561.