

文章编号:1006-9941(2019)04-0290-07

固体推进剂非线性压强耦合响应特性实验研究

金秉宁,刘佩进,魏少娟

(西北工业大学 燃烧热结构与内流场重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 为获得固体推进剂非线性压强耦合响应特性,建立了一种非线性压强耦合响应函数的实验测量方法,分别对三种含铝复合推进剂开展了非线性压强耦合响应函数(R_p)的实验研究,获得了推进剂非线性压强耦合响应特性,深入分析了非线性压强耦合响应的影响因素。结果表明,提高触发激励压强以及改变触发激励方式,可以在T型燃烧器中模拟与实际发动机非线性燃烧不稳定相类似的非线性压强振荡特性,从而获得固体推进剂非线性压强耦合响应特性。非线性压强耦合响应函数对轴向各阶频率振荡幅值的变化较为敏感,峰值频率附近的响应值对振荡幅值的变化最为敏感,响应值变化最大,其中响应函数峰值从0.4增大到1.12。中间位置触发激励产生的二阶频率响应值与线性法长度减半对应的一阶频率响应值有明显的不同,进一步验证了线性法和非线性测量结果本质区别。

关键词: 固体发动机;非线性燃烧不稳定;固体推进剂;压强耦合响应;实验测量

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018352

1 引言

固体火箭发动机非线性燃烧不稳定通常发生在发动机工作末期,呈现典型的非线性特征。其中推进剂的燃烧响应是固体发动机产生非线性燃烧不稳定的主要增益因素之一,受到火箭发动机研制者的广泛重视^[1-3]。由于对非线性燃烧响应机理认识不足,仅依靠线性压强耦合响应函数的测量难以解决实际发动机中出现的非线性燃烧不稳定问题。对于发动机中产生的压强振荡幅值较高且含有多阶声振频率时,推进剂的压强耦合响应表现出非线性特性^[4]。目前,对于非线性压强耦合响应产生的机理有了一些认识^[5],但仍缺乏相应的实验数据支撑,使得非线性压强振荡对压强耦合响应的影响机制仍没有明确的认

识。因此,需要对推进剂非线性压强耦合响应开展深入的研究。

近年来,对推进剂压强耦合响应特性开展了大量的理论研究^[6-8],已在理论上证明了压强振荡幅值对非线性压强耦合响应函数有较大的影响^[4]。然而,理论分析较难准确获得真实配方推进剂的非线性压强耦合响应特性,仍需要开展实验测量研究。实验方面,对于含铝量较高的复合推进剂,通常采用传统的外部触发激励T型燃烧器实验装置获得推进剂的线性压强耦合响应特性^[9-11]。此方法是通过改变T型燃烧器的长度获得声腔轴向一阶频率,测量该一阶频率的压强耦合响应函数值。通过降低该频率的压强耦合响应函数值,可以有效的抑制火箭发动机内的燃烧不稳定问题^[12-13]。然而,非线性燃烧不稳定问题非常复杂^[14-16],随着燃烧过程中不断有能量向声振系统中注入,低阶模态(一般指基频)振荡幅值增大的同时向高阶模态传递能量^[17-18],使得高阶模态振荡幅值增大,产生波形畸变,典型特征是:压强振荡频谱分布中包含多个不同频率的谐波,且低阶模态振荡幅值较大^[19]。对于这种多阶模态共存的情况,传统线性测量法^[11]无法获得非线性振荡条件下的压强耦合响应函数值,需要开展非线性压强

收稿日期:2018-12-17;修回日期:2019-01-23

网络出版日期:2019-02-24

基金项目:国家自然科学基金(51706186)

作者简介:金秉宁(1986-),男,博士,助理研究员,主要研究固体火箭发动机燃烧不稳定及控制技术。

e-mail:jinbingning@nwpu.edu.cn

通信联系人:刘佩进(1971-),男,教授,博士生导师,主要研究火箭发动机燃烧不稳定及燃烧诊断技术。e-mail:Liupj@nwpu.edu.cn

引用本文:金秉宁,刘佩进,魏少娟.固体推进剂非线性压强耦合响应特性实验研究[J].含能材料,2019,27(4):290-296.

JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, WEI Shao-juan. Experiments on the Characteristic of the Nonlinear Combustion Response Functions of Solid Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(4):290-296.

耦合响应函数测量研究。但是,关于非线性压强耦合响应函数实验研究的公开报道较少,国内仍缺乏有效的实验研究手段。

因此,本研究基于T型燃烧器测量技术,建立了一种非线性压强耦合响应函数的实验测量方法,开展了非线性压强耦合响应函数的实验测量研究,获得了非线性压强耦合响应特性,深入的分析了非线性压强耦合响应特性的影响因素,以为预估固体火箭发动机非线性燃烧不稳定提供了重要实验测量手段和数据支撑。

2 实验原理及方法

2.1 实验原理及装置

建立的非线性压强耦合响应函数测量方法是在不改变T型燃烧器长度的前提下,通过外部触发激发出声腔轴向高阶振荡模态,产生非线性压强振荡,根据各阶振荡频率幅值的变化和推进剂的燃烧特性获得非线性压强耦合响应函数分布曲线。

测量装置如图1所示,由四部分组成:T型燃烧器主体装置、触发激励装置、点火时序控制装置和数据采集装置。其中,喷管放置在T型燃烧器主体装置的中间位置,推进剂试件安放在T型燃烧器主体装置的两端;触发激励装置一般安放在声腔轴向声波的波腹位置;点火时序控制装置可满足两端推进剂试件同时点火和触发激励装置的时序控制要求;数据采集装置记录保存压强传感器测量的振荡数据。

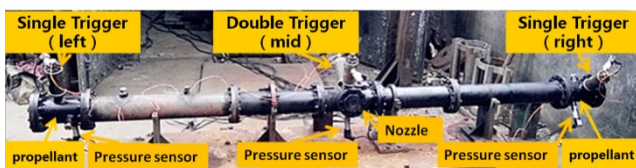
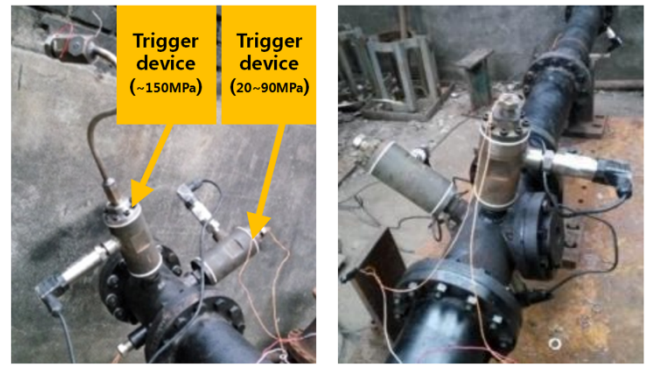


图1 非线性压强耦合响应函数实验装置

Fig.1 The assembling of the experimental system

2.2 外部触发激励方法

线性响应函数测量中采用低压强(20~30 MPa)触发激励装置,目的是只能激发出振荡幅值较小的声腔轴向一阶频率。如需在T型燃烧器内产生非线性压强振荡(振荡幅值大于平衡压强的1%且多阶模态共存),需要对原有触发激励装置和方法进行改进:一方面提高触发激励压强(~80 MPa),如图2a所示;另一方面改变触发激励方式,即加入中间位置同时激励,如图2b所示。



a. trigger device

b. trigger in the middle of the burner

图2 新型触发激励装置和方式

Fig.2 New trigger device and the way of triggering

2.3 测量原理及后处理方法

实验采用双激励触发的方式^[20],其中第一次激励在推进剂燃烧中间时刻,第二次激励在推进剂刚刚燃烧结束时刻。两次激励后分别产生两组非线性振荡数据。首先,采用 Galerkin 方法^[21-22]对非线性振荡数据进行离散,获得各阶频率的振荡数据。其次,根据两次触发激励后各阶频率振荡的衰减系数 $\alpha_{1,n}(f_n)$ 和 $\alpha_{2,n}(f_n)$,并结合T型燃烧器内的声能关系、推进剂物性参数以及各阶振荡频率 f_n ,得到各阶振荡频率的压强耦合响应函数值 $R_p(f_n)$;最后,对离散数据点采用最小二乘法拟合,得到响应函数分布曲线。

$$\hat{p}(x, t) = p_0(t) \sum_{m=1}^N \eta_m(t) \psi_m(\omega_m x) \quad (1)$$

$$R_p(f_n) = \frac{(\alpha_{1,n}(f_n) - \alpha_{2,n}(f_n)) \bar{p} \left(\frac{a_m}{a} \right)}{4 f_n \alpha \rho_p \bar{r}_p \left(\frac{S_B}{S_C} \right)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中, p_0 为初始振荡幅值, η_m 为各阶模态幅值, ψ_m 为各阶模态的振型; \bar{p} 为平均压强; ρ_p 为推进剂密度; \bar{r}_p 为测得的平均燃速; S_B/S_C 为推进剂燃面与通道面积之比, a 为理论声速(决定于推进剂燃烧温度); a_m 为测得的声速, $a_m = 2f_1 L$, L 为T型燃烧器长度。

2.4 推进剂试样

三种固体推进剂样品A、B、C均为四组元配方(高氯酸铵/黑索今/Al/粘合剂(AP/RDX/Al/粘合剂))的含铝复合推进剂,具体配方及燃速见表1。

3 线性和非线性实验测量

3.1 线性响应函数测量

根据线性响应函数测量方法可知^[11],需最少测量

表 1 三种固体推进剂配方成分

Table 1 Formulations parameters of three propellant samples

propellant sample	AP		RDX content /%	Al content /%	burning rate at 10 MPa /mm·s ⁻¹
	content /%	modal			
A	61	tripe	10	18	12.1
B	40	alual	20	18	7.6
C	61	quadruple	10	18	6.5

三个声腔基频频率的响应值,且压强振荡幅值小于平衡压强的1%。因此,三种含铝复合固体推进剂A、B、C分别在三种不同的振荡频率条件下进行测量,具体测试工况见表2;根据T型燃烧器内的工作压强、触发激励装置自身的自由容积以及一阶轴向声场的分布等参数,采用装有5g黑火药的触发激励装置在T型燃烧器两端(end)位置触发激励,触发激励压强在20~30 MPa,T型燃烧器内产生的振荡幅值均小于各自平衡压强的1%,如表2所示。

表 2 线性压强耦合响应函数实验测量工况及结果

Table 2 Experimental condition and results of linear pressure coupled response function

propellant sample	T-burner pressure p/MPa	linear oscillation results				
		first mode frequency/Hz	total amplitude (p'/p) /%			
A	6-7	144	255	670	0.06	0.85
B	10	175	255	340	0.05	0.5
C	9	175	340	670	0.07	0.77

对实验结果进行处理得到各个频率下的响应函数值并进行拟合,如图3所示。在0~1000 Hz内,三种推进剂线性压强耦合响应函数分布均呈单峰分布,但差别较大,这主要是与推进剂配方和工作压强等参数有关。其中,推进剂A的响应函数峰值较低,推进剂B的响应函数峰值高,但二者的频响范围均较窄且多集中在低频区域;推进剂C的响应函数峰值最低,但频响范围较宽且多集中在中频区域。

表 3 非线性响应函数测量工况及结果

Table 3 Experimental condition and results of nonlinear pressure coupled response function

propellant sample	T-burner pressure p/MPa	trigger number	nonlinear oscillation results		
			first mode frequency/Hz	total amplitude p'/MPa	(p'/p)/%
A	6-7	1	-144	0.15	2.1
B	-10	1	-175	0.12	1.2
C	-9	1	-175	0.18	2
		2	-175	0.28	3

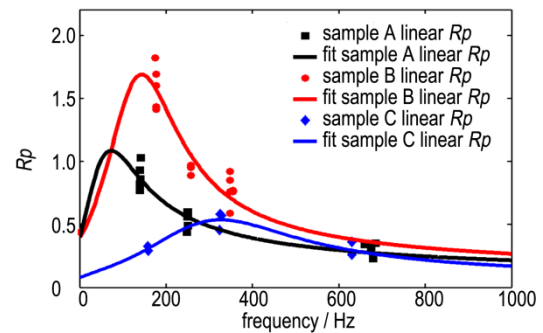


图 3 三种推进剂线性响应函数结果

Fig.3 Response function results of three propellants

3.2 非线性压强耦合响应函数测量

为对比非线性响应函数与线性响应函数之间的不同,实验仍采用推进剂A、B和C在各自相同压强下进行实验测量。采用两种不同声振特性的T型燃烧器实验装置,其声腔轴向一阶频率分别约为144 Hz和175 Hz,二阶响应频率分别约为288 Hz和340 Hz,三阶响应频率约为430 Hz和510 Hz。外部触发激励装置装药量采用15 g,产生的激励压强约为80 MPa,具体实验工况如表3所示。

推进剂A在高压触发激励下产生振荡幅值约为0.15 MPa,约为平衡压强的2.1%,并且同时激发出前六阶振荡频率;推进剂B在激励后产生的振荡幅值约为0.12 MPa,约为平衡压强的1.2%,并且同时激发出前三阶振荡频率;而推进剂C分别采用单次1个激励和单次2个激励的方式,分别产生0.18 MPa和0.28 MPa的振荡幅值,约为平衡压强的2%和3%,并且两种激励方式均激发出前五阶振荡频率。根据文献[23]判断,高压触发激励后产生的振荡幅值均高于平均压强的1%,且同时激发出高阶振荡频率,并伴随有明显的平均压强上升,这与线性测量结果有明显的不同。因此分析认为表3中产生的振荡为典型的非线性压强振荡。

采用2.3节的数据处理方法获得三种推进剂的非线性响应函数分布曲线,并与线性响应函数进行对比

分析,结果如图4所示。在0~1000 Hz,非线性响应函数值明显高于线性方法测量的结果,尤其是高阶模式下的响应函数值增大较为显著。分析认为,响应函数的变化主要是受各阶振荡幅值的影响,线性响应函数测量方法是基于小扰动理论,即被测频率振荡幅值不超过1%,并且改变T型燃烧器长度获得不同振荡基频作为被测频率,测量结果可认为是推进剂响应特性的基本属性,该特性与推进剂自身配方和工作压强有关;而非线性响应函数测量的振荡幅值明显高于1%,且保持基频不变,高频被激发,多阶模式共同作用于推进剂燃烧,导致非线性测量结果与非线性振荡特性有密切的关系,从而改变了推进剂响应特性的基本属性,表

现出与非线性振荡特性相关的应用属性。这也是采用传统线性法测量得到较为稳定的推进剂(响应函数值小)在实际发动机非线性不稳定中表现出较强的燃烧增益作用的原因所在。这一现象在非线性和不稳定分析中需要特别注意。

从测量结果中可以发现,触发激励方式的改变,使得振荡特性发生变化,相应的压强耦合响应特性发生明显的变化,三者之间存在一定的耦合关系。因此,下一部分将详细讨论触发激励对压强振荡特性以及压强耦合响应函数特性的影响规律。

4 非线性压强耦合响应特性的影响规律

为了对比非线性响应函数与线性响应函数测量结果之间的不同,并且进一步分析触发激励压强对非线性响应函数的影响规律,针对推进剂C在相同的工作压强条件下,分别采用4种不同触发激励压强和2种触发激励方式开展试验测量工作。其中T型燃烧器内的工作压强均为~9.5 MPa,振荡基频均为~175 Hz,触发激励次数均为1次,具体实验工况如表4所示。

表4 非线性实验触发激励实验工况

Table 4 Nonlinear experimental of trigger conditions

No.	trigger pressure p / MPa	power mass / g	trigger position
1 [#]	20-30	5	End
2 [#]	50-60	10	End
3 [#]	80-90	15	End
4 [#]	150	27	End
5 [#]	50-60	10	Middle

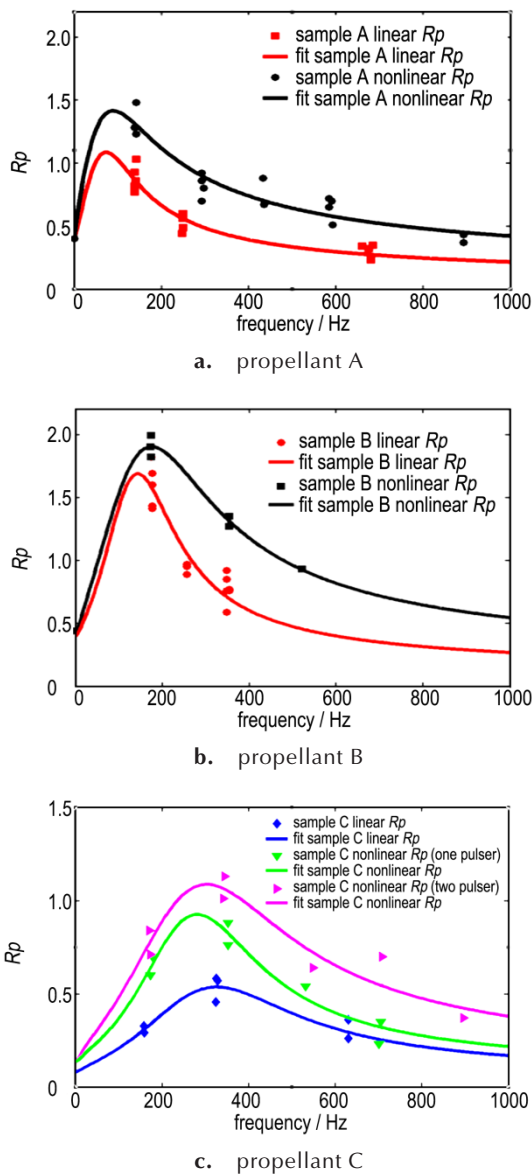


图4 三种推进剂非线性响应函数结果

Fig.4 Nonlinear response function results of three propellants

4.1 触发激励对压强振荡特性的影响分析

(1) 触发激励压强的影响

1[#]~4[#]对比了不同触发激励压强对压强振荡特性的影响,其结果如图5所示。由图5可以看出,触发激励压强增大,总振荡幅值越高,尤其是触发激励压强超过100 MPa时,总振幅值变化显著。振荡幅值从约0.04 MPa(约0.416%)增大到约0.45 MPa(5.6%)。对每个工况的压强振荡进行FFT分析,获得各阶声振荡频率的幅值信息。当触发激励压强较小时(20~30 MPa),振荡幅值主要以声腔轴向一阶基频幅值为主,二阶和三阶幅值微弱;而随着触发激励压强的增大,更高阶模式被激发出来,振幅相应增大,但一阶基频幅值仍是最高;当触发激励压强达到约150 MPa时,前五阶模式的振荡幅值被激发出来,产生振荡幅值较大。

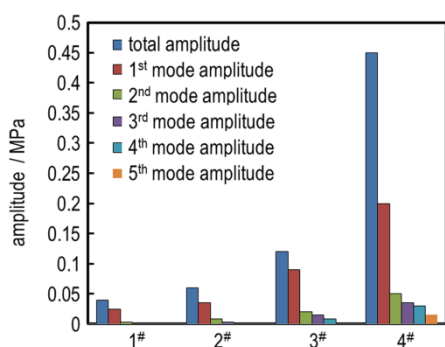


图5 触发激励压强对声振幅值的影响

Fig.5 Effect of the trigger pressure on the oscillation amplitude

分析认为,在声腔两侧位置进行触发激励,一阶基频最容易也最先被激发出来,同时能量从低阶向高阶传递,激发出高阶频率的振荡,使压强振荡呈典型的非线性特性,即振幅由多个频率的幅值叠加产生,并且各阶幅值之间的关系均是低阶幅值高于高阶幅值。这种振荡特性随着触发激励压强的增大,各阶频率振荡幅值会进一步增大,产生更多高阶声振模态,总振荡幅值也会增加。

(2) 触发激励方式的影响

2#和5#对比了不同触发激励方式对非线性振荡特性的影响,其结果如图6所示。单侧高压触发激励(2#)产生的总振荡幅值明显高于中间位置激励(5#)产生的幅值;其中,2#振荡中的轴向一阶频率的振荡幅值约为0.035 MPa,二阶频率的幅值约为0.009 MPa;5#振荡中的轴向一阶频率的振荡幅值几乎为0,二阶频率的幅值约为0.015 MPa。分析表明,在T型燃烧器两端触发激励产生的振荡是以轴向一阶频率为主,而在中间触发激励产生的振荡是以轴向二阶频率为主。

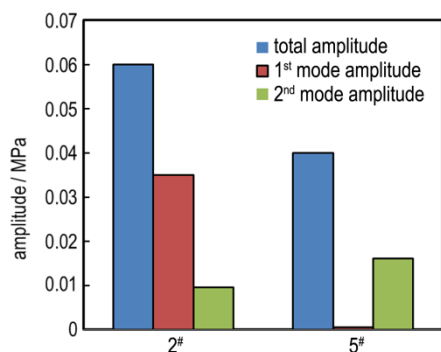


图6 触发激励位置变化对振荡幅值影响的结果

Fig.6 Effect of the trigger position on the oscillation amplitude

4.2 触发激励对响应函数的影响分析

(1) 触发激励压强对响应函数的影响

图7为1#~4#响应函数测量结果,其中1#采用线性

法获得的结果,并作为基准结果与其他结果进行对比分析。在0~1500 Hz内,所有工况测量得到的压强耦合响应函数分布均是呈单峰分布。随着触发激励压强的增大,各个频率下的响应函数值均呈增大的趋势变化,尤其在峰值附近频率的响应函数值变化最为明显,振荡幅值从0.04 MPa增大到0.45 MPa,响应函数峰值从0.4增大到1.12,增大了2.8倍,对触发激励压强的变化最为敏感。

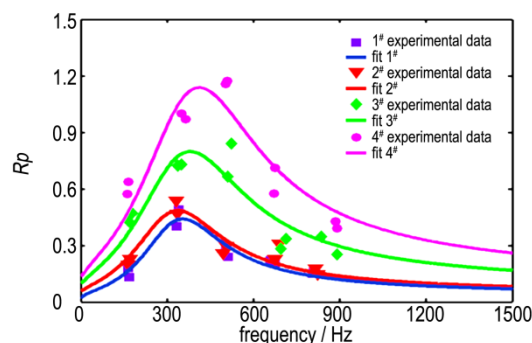


图7 不同触发激励压强下的非线性响应函数

Fig.7 The curves of the nonlinear response functions at different trigger pressures

对声腔轴向前四阶频率的响应函数值进行对比分析,可以看出二阶和三阶频率的响应函数值对各自振荡幅值的变化最敏感,而一阶频率和四阶频率的响应函数相对变化较小,如图8所示。

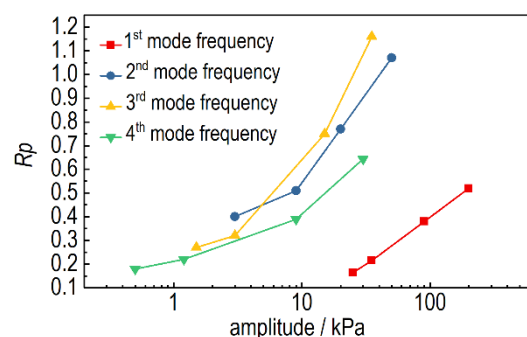


图8 前四阶振荡频率响应函数值变化规律

Fig.8 The change of the response function value of first four mode frequency

由图8可知,触发激励压强的增大,使得压强振荡幅值增大,相应各阶频率的幅值增大,与推进剂燃烧表面进一步产生耦合作用,大幅度振荡作用在燃烧表面,造成火焰高度降低、温度梯度增大以及对固相的热反馈过程增大,使得燃面温度升高、固相热分解过程发生周期性的大幅变化,从而导致推进剂质量释放率和热释放率增大,压强耦合响应作用加剧,因此表现出来的响应函数值增大。

(2) 触发激励方式对响应函数的影响

图9为2#和5#响应函数测量结果,对比一阶频率和二阶频率的响应函数值可以看出,中间触发激励产生的响应函数值明显高于单侧触发激励产生的非线性二阶响应函数值。根据文献[5]的推进剂非匀质燃烧响应理论分析认为,中间触发激励只产生二阶频率振荡,该振荡频率时间间隔 Δt 与推进剂压强耦合响应特征时间 τ 相接近,耦合效应最强;并且振荡幅值的增大,导致推进剂燃烧表面火焰热反馈速率增加,固相热分解加剧,燃面温度和质量释放率增大。因此,该推进剂二阶频响值对频率幅值变化较为敏感,这一典型结果与推进剂配方中的高氯酸铵粒度和级配有较大的关系,将在今后的研究中进一步阐述。

对比2#和5#结果可以看出,中间触发激励的二阶模态响应函数值($R_p(f_2)$)明显高于采用线性测量法长度减半所对应基频的响应函数值 $R_p(2f_1)$ (图9)。分析认为,不同的声腔长度反映出不同的声振特性,使得触发激励产生的振荡传递过程各不相同,对推进剂燃烧耦合作用和响应过程各不相同。因此,该实验结果也进一步说明了线性响应函数测量结果为什么难以解释实际发动机中非线性响应特性,即 $R_p(f_2) \neq R_p(2f_1)$ 。

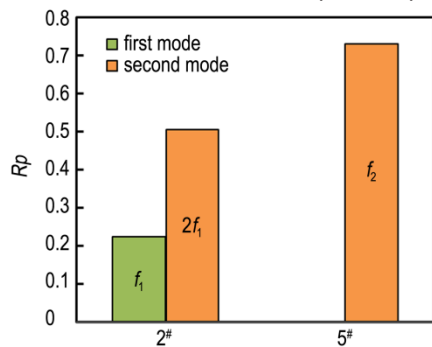


图9 触发激励位置对响应函数的影响

Fig.9 Effect of the trigger position on the nonlinear response function

综上,采用不同触发激励压强和不同触发激励方式,可获得不同振荡特性的非线性压强振荡,使得推进剂的非线性压强耦合响应特性变化规律各不相同,其中峰值频率附近的响应值对振荡幅值较为敏感,在相同的幅值变化下,该频率范围的响应函数值变化较大。

5 结论

(1) 提高触发激励压强以及改变触发激励方式,可以在T型燃烧器中模拟与实际发动机非线性燃烧不稳定相类似的非线性压强振荡特性,从而获得固体推

进剂非线性压强耦合响应特性;

(2) 非线性压强耦合响应函数对轴向各阶频率的振荡幅值的变化较为敏感,尤其是峰值频率附近的响应值对振荡幅值变化最为敏感,振荡幅值从0.04 MPa增大到0.45 MPa,响应函数峰值从0.4增大到1.12,增大了2.8倍;

(3) 单独触发产生二阶频率的响应值 $R_p(f_2)$ 与线性法长度减半对应一阶频率的响应值 $R_p(2f_1)$ 有明显的不同,验证了线性法和非线性测量结果的不同。

参考文献:

- [1] Blomshield Fred S. Historical perspective of combustion instability in motors: case studies[C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, UT, AIAA: 2001.
- [2] 陈晓龙,何国强,刘佩进. 固体火箭发动机燃烧不稳定的影响因素分析和最新研究进展[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6): 600-605.
CHEN Xiao-long, HE Guo-qiang, LIU Pei-jin, et al. Analysis of influencing factors of combustion instability in SRM and current progress [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, 32(6): 600-605.
- [3] Blomshield Fred S. Lessons learned in solid rocket combustion instability [C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, AIAA:2007.
- [4] 刘佩进,金秉宁,魏祥庚,等. 固体推进剂非线性压强耦合响应特性分析[J]. 推进技术, 2016, 37(9):1601-1608.
LIU Pei-jin, JIN Bing-ning, WEI Xiang-geng, et al. Analysis of nonlinear pressure coupled response function of solid propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1601-1608.
- [5] Rasmussen B, Frederick R A. Nonlinear heterogeneous model of composite solid-propellant combustion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(5): 1086-1092.
- [6] Favale G, Miccio F. Modeling unsteady and perturbed combustion of heterogeneous composite propellants[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2008(12):285-294.
- [7] Shusser M, Culick F E C. Analytical solution of pressure-coupled combustion response functions of composite solid propellant[J]. *Journal Propulsion Power*, 2008, 24:1058-1067.
- [8] Shusser M, Culick F E C, Cohen N S. Combustion response of ammonium perchlorate composite propellants [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40:720-730.
- [9] Wilbur C, Schoner R J. The T-burner test method for the combustion response of solid propellants [C]//8th Joint Propulsion Specialist Conference, New Orleans, LA, AIAA: 1972.
- [10] Blomshield F S. Pressure-coupled response of solid propellants [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2011, 10(2):85-105.
- [11] 刘佩进,齐宗满,金秉宁,等. 两种含铝复合推进剂压强耦合响应的试验对比[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1):83-88.
LIU Pei-jin, QI Zhong-man, JIN Bing-ning, et al, Experiment comparison of pressure coupled response of the aluminized composite propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(1):83-88.
- [12] 刘佩进,金秉宁,李强. 战术导弹固体发动机燃烧不稳定研究概述[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(4):446-449.

- LIU Pei-jin, JIN Bing-ning, LI Qiang. A survey of combustion instability in tactical SRM[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(4):446-449.
- [13] 王宁飞, 张峤, 李军伟, 等. 固体火箭发动机不稳定燃烧研究进展[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(6):1405-1414.
- WANG Ning-fei, ZHANG Qiao, LI Jun-wei, et al. Progress of investigation on combustion instability of solid rocket motors [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(6): 1405-1414.
- [14] Casalis G, Boyer G, Radenac E. Some recent advances in the instabilities occurring in long solid rocket motors [C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California: AIAA:2011.
- [15] Flandro G A, Fischbach S R, Majdalani J, et al. Nonlinear rocket motor stability prediction: limit amplitude, triggering, and mean pressure shift[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, 2004.
- [16] Blomshield F S, Mathes H B, Crump J E, et al. Nonlinear stability testing of full-scale tactical motors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(3):356-366.
- [17] Flandro G A. Energy balance analysis of nonlinear combustion instability[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1985, 1(3): 210-221.
- [18] Jacob E J, Flandro G A, Gloyer P W. Nonlinear energy transfer applied to data analysis in combustion instability[C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California, 2011.
- [19] Jacob E J. Nonlinear triggering of combustion instability in solid rocket motors[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, 2012.
- [20] 刘佩进, 何国强, 等. 固体火箭燃烧不稳定及控制技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2015:94-100.
- LIU Pei-jin, HE Guo-qiang, et al. Combustion instability and control technology of solid rocket motor [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University press, 2015: 94-100.
- [21] Quarteroni A, Sacco R, Saleri F. Numerical mathematics[M]. Springer Science & Business Media, 2010: 554-559.
- [22] Jacob E J. A study of nonlinear combustion instability[J]. *Doctoral Dissertations*, 2009: 646.
- [23] 金秉宁, 刘佩进, 魏祥庚, 等. 基于T型燃烧器的非线性不稳定参数分析[J]. *固体火箭技术*, 2016, 39(3): 301-305.
- JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, WEI Xiang-geng, et al. Parameter analysis of nonlinear combustion instability based on T-burner [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2016, 39(3): 301-305.

Experiments on the Characteristic of the Nonlinear Combustion Response Functions of Solid Propellants

JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, WEI Shao-juan

(Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to obtain the characteristics of nonlinear pressure coupling response of solid propellants, a method for measurement of the nonlinear pressure coupling response function of solid propellants was established. The nonlinear pressure coupling response functions of three formulations of aluminum propellants were obtained. The characteristics of the nonlinear pressure coupling response of propellants were also analyzed in detail. It indicates that with increase of the trigger pressure, higher-order frequency oscillations can be excited and the amplitude of nonlinear oscillation could be larged as well. By triggering at the both ends of the chamber, the oscillation is dominated by the longitudinal first-order frequency, but when triggering in the chamber middle, the oscillation is dominated by the longitudinal second-order frequency. The nonlinear pressure coupling response function is sensitive to the amplitude of the oscillation, whereas the response value near the peak frequency is the most sensitive to the change of the amplitude of the oscillation. The response value is significantly different between the second-order frequency by triggering in the chamber and the first-order frequency by triggering at end of the half-length chamber. This result just verifies the method of the linear and nonlinear methods are different.

Key words: solid rocket motor; nonlinear combustion instability; solid propellant; combustion response; T-burner experimental measurement

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018352

(责编:张琪)



《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部