

文章编号:1006-9941(2020)04-0291-09

AP多粒度级配固体推进剂非稳态燃烧响应模型

金秉宁,刘佩进,徐冠宇

(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: 为获得高氯酸铵(AP)粒度级配对固体推进剂燃烧响应特性的影响,以氧化剂单粒度的多火焰稳态燃烧模型(BDP)为基础,考虑实际推进剂中AP多级配粒度分布,建立了AP多粒度级配的AP/端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂非稳态燃烧响应模型,并对模型进行校验。针对由四种AP粒度330,250,110 μm 和50 μm 组合成的几十种AP多级配复合推进剂,分别在工作压强10 MPa、振荡频率25~1000 Hz条件下开展了燃烧响应特性研究,分析了AP粒度级配和配比等参数变化对压强耦合响应函数的影响规律。模型计算结果表明,100~1000 Hz,燃烧响应模型计算结果与文献实验测量结果吻合较好(实验压强>5 MPa),误差小于9%。AP粒度配比与级配对燃烧响应函数的分布影响较大,影响规律基本满足:AP多级配中提高小粒度AP的配比含量或者降低大粒度AP配比含量可以抑制中低频振荡,但同时会增益中高频振荡。用中粒度AP替代小粒度AP可以抑制中高频振荡,反之,替代大粒度AP则可以抑制中低频振荡。

关键词: 燃烧不稳定;固体推进剂;高氯酸铵(AP);多粒度级配;燃烧响应模型

中图分类号:V435

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019017

1 引言

固体推进剂燃烧响应是燃烧不稳定的主要影响因素。近年来,从全尺寸发动机研制过程中发现,同样的装药结构,推进剂配方的微小变化、原材料批次以及工艺等因素均会导致推进剂燃烧响应特性的变化,产生燃烧不稳定问题。由于缺乏对燃烧响应机理的深入认识,发动机研制中往往采用“改配方-测量-再改配方-再测量”的方法,降低推进剂燃烧响应的增益作用。但这种研究方法效率低、周期长、实验次数多、难以快速准确地提出合理解决方案,从而给研制者们带来极大的困难。因此,十分有必要开展实际配方组分对固体推进剂燃烧响应影响规律的理论研究,为发动机研制提供有力的理论支撑和改进依据。

固体推进剂燃烧响应理论的研究需从稳态燃烧特

性和非稳态燃烧特性^[1-2]两个方面开展。国外开展了大量研究。其中,Culick^[3-5]建立了均质推进剂一维准稳态气相燃烧模型(QSHOD模型),并将高氯酸铵(AP)燃烧模型带到参数A和B中进行修正,获得AP粒度对响应函数的影响。Rasmussen等^[6]以一维多火焰稳态燃烧模型(BDP)^[7]为基础,建立了一维复合推进剂压强耦合响应模型,获得了AP含量、粒度以及工作压力等参数对燃烧响应特性的影响,加深了研究者们对非均质推进剂燃烧响应特性的认识。Glick等^[8]在燃烧过程中考虑了多元、多级配氧化剂的组成,建立了“小系统综合(PEM)”稳态燃烧模型。Cai等^[9-10]建立了二维三明治模型,获得了AP粒径、压强对燃速和火焰高度的影响以及瞬态压强振荡之后推进剂的火焰结构和燃烧响应特性。Jackson等^[11]采用“Random Pack”模型,对复合推进剂进行了三维数值模拟,获得了多级配AP复合推进剂的压强耦合响应函数。但该模型需要的计算资源较大,计算时间较长。Renie和Osborn^[12]基于小扰动理论,分析了氧化剂颗粒大小、燃烧室压强和平均流速对燃烧响应函数的影响。国内主要开展了稳态燃烧模型方面的研究。其中,周志清等^[13]采用多步化学反应动力学机制,建立了三明治二

收稿日期:2019-01-18;修回日期:2019-03-11

网络出版日期:2019-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助(51706186)

作者简介:金秉宁(1986-),男,助理研究员,主要从事固体火箭发动机燃烧不稳定控制技术和固体推进剂燃烧诊断研究。

e-mail:jinbingning@nwpu.edu.cn

引用本文:金秉宁,刘佩进,徐冠宇. AP多粒度级配固体推进剂非稳态燃烧响应模型[J]. 含能材料,2020,28(4):291-299.

JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, XU Guan-yu. Unsteady Combustion Response Model of Multi-modal Ammonium Perchlorate Composite Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(4):291-299.

维细观燃烧模型。赵瑜基于详细化学动力学机制,建立了复合推进剂燃烧模型^[14]。张炜等建立了AP/黑索今(RDX)两种氧化剂含量和粒度级配可任意变化的AP/RDX/端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂稳态燃烧模型^[15]。彭培根等基于以往复合推进剂燃烧模型和大量实验现象提出了一个AP/RDX推进剂的复合多火焰燃烧模型^[16]。刘佩进等从燃烧学、声学 and 动力学出发,对复合推进剂的压强耦合响应开展了理论、实验和数值计算研究^[17],对复合推进剂的燃烧响应特性有了较全面的认识。

综上所述,国外对于均质和非均质推进剂燃烧响应模型开展了大量的研究,但关于非均质推进剂中氧化剂粒度级配及配比对响应函数影响的研究较少;国内对于均质和非均质推进剂的稳态燃烧模型开展了大量的研究,而燃烧响应模型则研究较少,关于推进剂配方组分对响应函数影响的认识大多是基于实验测量结果,对燃烧响应机理缺少深入的认识,使得工程研制中较难提出降低推进剂压强耦合响应函数的抑制方法。

为此,本研究以BDP多火焰燃烧模型为框架,考虑实际推进剂中AP多级配粒度分布,建立AP多粒度级配的AP/HTPB推进剂燃烧响应模型,对模型进行校验。并针对几种常用的AP粒度,在不同粒度级配和配比条件下开展非稳态计算,深入分析AP粒度、级配和配比等参数变化对压强耦合响应函数的影响规律。

2 AP多粒度级配燃烧响应模型

BDP多火焰模型假设复合推进剂仅由单一粒径AP和HTPB粘合剂组成^[4,6],属于双组元推进剂。模型包含AP分解焰、扩散火焰和初焰的多火焰结构。AP分解焰为AP分解产物 NH_3 与 HClO_4 的反应,产生于AP“气柱”中,向燃面反馈热量,属于预混火焰。初焰为AP分解产物与粘合剂热解产物之间的化学反应,受扩散和化学反应速率影响,属于扩散火焰。终焰为粘合剂热解产物和AP焰富氧产物间的反应,位于AP分解焰外端,属于扩散火焰。与AP分解焰是相连,并向燃面反馈热量。该模型的主要假设如下:

- (1) 沿垂直燃烧表面方向视为一维;
- (2) AP和粘合剂表面分解反应符合Arrhenius定律;
- (3) AP和粘合剂具有不同的表面温度;
- (4) 气相反应为简单均相反应,且产物为完全气体。

2.1 AP多级配模型构建

对于AP多级配推进剂来说,可将AP多粒度级配AP/HTPB复合推进剂视为由多个假定AP单粒度AP/HTPB系统组合而成^[18],假设AP表面的单元火焰是相互独立燃烧,并将推进剂重新排列成多组各包含一种AP粒度的假想单级配推进剂(如图1所示)。这里考虑的AP四级配推进剂,其中AP粒度分别为I类、II类、III类和细AP。

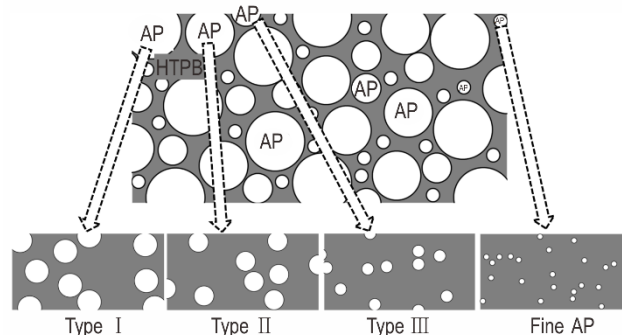


图1 AP四级配假想推进剂模型

Fig.1 The sketch of Quadruplemodal propellant model

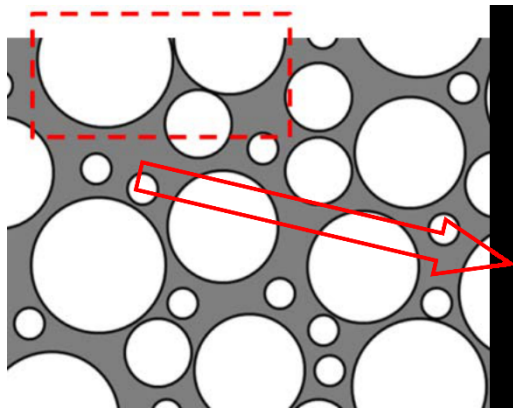
重新排列的AP单级配假想推进剂火焰构型满足BDP多火焰模型,其中,AP分解火焰和扩散终焰受AP粒度尺寸影响较大,需要根据不同AP粒度尺寸条件分别计算,图2所示为相邻两个不同AP粒径的火焰模型示意图。

从图2可以看出,相邻的两个AP粒子,由于粒度不同,相应的分解焰 $x_{f,AP}$ 、 x_f 和终焰 x_r 各不相同,并且AP表面温度 $T_{s,AP}$ 和热反馈量 Q_L 也各不相同。因此,多级配模型中的火焰个数取决于AP粒径种类数量,如果是AP四级配,则有四个不同尺寸的 $D_{AP,n}^*$ 、四个AP分解焰 $x_{f,AP,n}$ 、四个AP表面温度 $T_{s,AP,n}$;对于粘合剂,为了简化计算,其表面温度按照小尺寸AP颗粒周围的粘合剂温度计算;多级配推进剂的燃烧速率由各个单级配的结果按照其AP质量含量比例所占权重综合统计计算,且模型中各组分的质量通量由AP单级配BDP火焰模型决定。

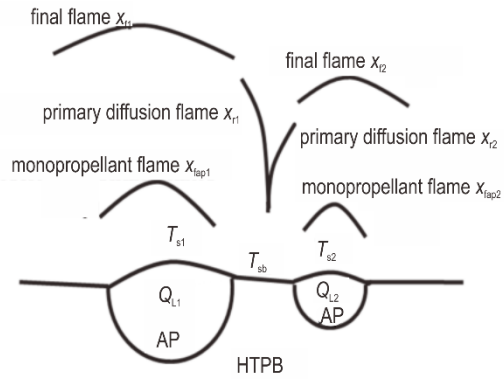
2.1.1 稳态燃烧模型

根据实际推进剂配方AP粒度分布,改进模型中I类AP平均粒径为 $D_{AP,1}$,含量为 α_1 ;II类AP平均粒径 $D_{AP,2}$,含量 α_2 ;III类AP平均粒径 $D_{AP,3}$,含量为 α_3 ;细粒度AP平均粒径 $D_{AP,4}$,含量为 α_4 ; α_{AP} 为AP总含量,如公式(1)所示,而HTPB含量为 $1-\alpha_{AP}$ 。

$$\alpha_{AP} = \sum \alpha_n = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad (1)$$



a. schematic diagram of AP particles distribution



b. flame structure for two adjacent AP particles

图2 相邻两个不同AP粒径的火焰模型示意图

Fig.2 The proposed flame structure for two adjacent AP particles

根据文献[6]中AP单级配推进剂质量通量的表达式,AP多级配推进剂中每种AP单级配推进剂的质量通量 $G_{p,n}$ 和多级配推进剂总质量通量 G_p 可表示如下:

$$G_{pn} = \frac{1}{\frac{\alpha_{AP}}{G_{AP,n}} + \frac{1 - \alpha_{AP}}{G_b}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

$$G_p = \sum \alpha_n * G_{p,n} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中, α_{AP} 为AP(氧化剂)含量, n 则代表AP级配数, $G_{AP,n}$ 为各个粒度的氧化剂质量生成速率, G_b 为粘合剂的质量生成速率,其表达式如下^[6]:

$$G_{AP,n} = A_{s,AP} \exp\left(-\frac{E_{s,AP}}{RT_{s,AP,n}}\right) \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

$$G_b = A_{s,b} \exp\left(-\frac{E_{s,b}}{RT_{s,b}}\right) \quad (5)$$

式中,在多级配模型中,不同AP粒子具有不同表面温度 $T_{s,AP,n}$,其表达式如下所示^[6]:

$$T_{s,AP,n} = \frac{G_{AP,n} C_{p,s,AP} T_i + \lambda_{g,AP} T_{f,AP,n} \frac{\nu}{X_{f,AP,n}} + G_{AP,n} q_{v,AP}}{G_{AP,n} C_{p,s,AP} + \lambda_{g,AP} \frac{\nu}{X_{f,AP,n}}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

$$T_{s,AP,n} = \frac{G_{AP,n} C_{p,s,AP} T_i + \lambda_{g,AP} T_{f,AP,n} \frac{\nu}{X_{f,AP,n}} + G_{AP,n} q_{v,AP} - \int_{-\infty}^0 \rho_{s,AP} C_{p,s,AP} \frac{\partial T}{\partial t} dx}{G_{AP,n} C_{p,s,AP} + \lambda_{g,AP} \frac{\nu}{X_{f,AP,n}}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

$$T_{s,b} = \frac{G_b C_{p,s,b} T_i + \lambda_{g,b} T_{f,b} \frac{\nu}{X_f} + G_b q_{v,b} - \int_{-\infty}^0 \rho_{s,b} C_{p,s,b} \frac{\partial T}{\partial t} dx}{G_b C_{p,s,b} + \lambda_{g,b} \frac{\nu}{X_f}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

而粘合剂温度采用统一值 $T_{s,b}$,取最小尺寸AP颗粒周围的粘合剂温度^[6]:

$$T_{s,b} = \frac{G_b C_{p,s,b} T_i + \lambda_{g,b} T_{f,b} \frac{\nu}{X_f} + G_b q_{v,b}}{G_b C_{p,s,b} + \lambda_{g,b} \frac{\nu}{X_f}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

相应的AP多级配的AP分解焰火焰温度 $T_{f,AP,n}$ 、AP分解焰火焰高度 $x_{f,AP,n}$,初始扩散火焰高度 $x_{f,n}$,扩散终焰高度 $x_{i,n}$ 均与单级配模型表达式相一致,与AP等效粒径有关,其各个级配AP等效粒径的表达式如下^[6]:

$$D_{AP,n}^* = \frac{2D_{AP,n}}{\sqrt{\frac{\rho_p G_{AP,n}}{\rho_{AP} G_{p,n}}}} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

2.1.2 非稳态燃烧模型

AP多级配非稳态模型计算,基本上与AP单级配非稳态模型相同。当推进剂进行非稳态燃烧时, $\partial T/\partial t \neq 0$,此时模型中各个火焰的高度、温度等参数均会随时间变化,因此需要考虑AP和粘合剂表面能量方程中随时间变化的积分项。其非稳态条件下的AP和粘合剂表面温度^[6]:

式中,多级配AP颗粒表面温度 $T_{s,AP,n}$ 和粘合剂表面温度 $T_{s,b}$ 须采用非稳态计算结果表征非稳态特性。而AP质量通量 $G_{AP,n}$ 、粘合剂质量通量 G_b 和推进剂总质量通量 G_p 是 $T_{s,AP,n}$ 、 $T_{s,b}$ 和 $(T_{s,AP,n}, T_{s,b})$ 的函数。关于 $x_{f,n}$ 、 $x_{r,n}$ 、 $x_{f,AP,n}$ 和 $T_{f,AP,n}$ 的计算,则采用稳态计算结果进行插值计算出压强扰动条件下不同时刻压强所对应的值,作为已知参数来求解非线性方程组。

2.1.3 AP多级配燃烧响应函数构造

稳态和非稳态结果中包含了多个参变量,如 $G_{p,n}$ 、 $G_{AP,n}$ 、 G_b 、 $T_{f,n}$ 、 $T_{s,AP,n}$ 、 $T_{s,b}$ 、 $x_{f,n}$ 、 $x_{r,n}$ 、 $x_{f,AP,n}$,这些参数作为非稳态计算工况的初始参数,用来计算推进剂内部温度分布和不同时刻下各参数变化情况,并根据计算结果获得推进剂的压强耦合响应函数。压强耦合响应函数 $R_p=(r'/\bar{r})(p'/\bar{p})$ 中的 p'/\bar{p} 为压强波动与平均压强的比值,是模型初始参数给定的量;因此,构建响应函数的关键参数即通过模型获得燃速扰动量 r' 和平均量 \bar{r} 的比值。然而对于非稳态模型计算结果可以获得燃速扰动量 r' ,通过 r' 进行平均化处理方可得到燃速的平均量。燃速平均量的处理方法如下:

$$\bar{r} = (r_{\max} + r_{\min})/2 \quad (11)$$

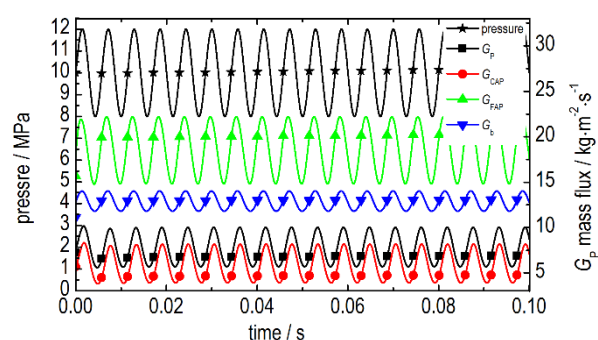
非稳态下,压强振荡随时间按公式(10)作正弦扰动,此时 $\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$ 。

$$p(t) = p_0 + mag \times \sin(2\pi ft) \quad (12)$$

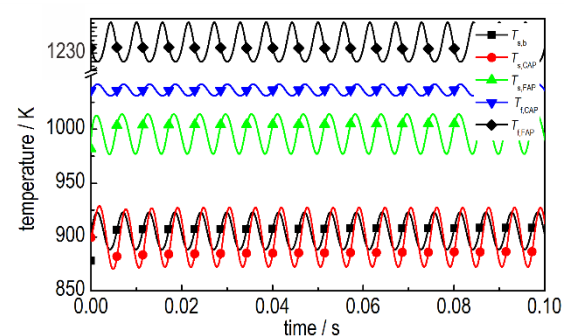
式中, p_0 为平衡压强; mag 为扰动幅值(未特殊说明均采用平衡压强的20%); f 为扰动频率; t 为燃烧时间。通过改变正弦压强波动函数的频率进行非稳态计算可以获得不同扰动频率下的燃速-时间曲线。

图3为平衡压强在10 MPa,振荡频率为175 Hz,振荡幅值为平衡压强的20%时的压强振荡时间曲线以及模型中所有参变量随时间振荡变化曲线,模型中AP总质量分数为80%,AP采用两种粒度(50/200 μm),质量配比为8:1,表面温度为298 K。可以看出,随着压强振荡输入量的变化,模型中AP和粘合剂以及推进剂总质量通量随时间呈周期性的振荡变化,振荡频率与压强振荡频率相同。并且推进剂燃烧表面的温度也随压强振荡的变化呈正弦波动,波动频率与压强振荡频率相同。

AP多级配推进剂燃烧模型采用Matlab计算平台编程计算,与AP单级配模型基本上相同,均是分别求解稳态(公式(1)~(8))和非稳态(公式(9)~(11))的非线性方程组。然而,对于不同AP级配来说,其稳态和非稳态的非线性方程组的数量不同,级配越多,方程数



a. mass flux response to oscillation pressure input



b. unsteady temperature of different flame

图3 振荡条件下模型参数振荡曲线

Fig.3 Typical model parameters response to oscillation pressure input

量也越多,计算量也越大,计算时间更长。AP单级配燃烧响应模型计算的非线性方程数量是11个,而本文建立的AP四级配燃烧响应模型则由36个非线性方程组成。该模型仍是AP和HTPB双组元推进剂,其中AP质量分数为73%~87%,初始温度为298 K,计算压强2~20 MPa内均可以获得燃烧响应函数。

2.2 模型校验

2.2.1 稳态模型校验

针对建立的AP多组元AP/HTPB推进剂燃烧模型,首先根据国内外文献资料中的实验结果对稳态燃烧模型进行验证。分别采用文献^[19]中相关的实验数据进行模型校验。其中AP粒度含量约为80%,AP级配分别为双级配、三级配和四级配,AP粒度分别采用400,200,90,50 μm 和20 μm ,基本涵盖了AP各种粒度分布。表1给出了具体的粒度级配和配比参数。

模型中用到的AP和HTPB的指前因子 $A_{s,AP}$ 、 $A_{s,b}$ 、活化能 $E_{s,AP}$ 、 $E_{s,b}$ 以及比热容 $c_{p,g,AP}$ 、 $c_{p,s,b}$ 等参数值详见文献^[20]。模型计算结果和实验结果如图4所示。

由图4可知,在高压强条件下(>5 MPa),多级配稳态燃烧模型的计算值与实验测量值之间的误差均小

表1 推进剂配方参数及计算工况

Table 1 Propellant formulations and detailed conditions for calculation

sample No.	AP modal	particle size / μm	$\alpha_{\text{AP}} / \%$	AP mass content ratio in particle combination	pressure / MPa
A				36.15:63.85	
B	Dual	90/20	80	48.19:51.81	
C				53.2:46.8	1-20
D	Triple	400/50/20	80	36.15:48.19:15.66	
E	Quadruple	400/200/50/20	80	36.15:36.15:12.04:15.66	

Note: α_{AP} is the content of oxidant.

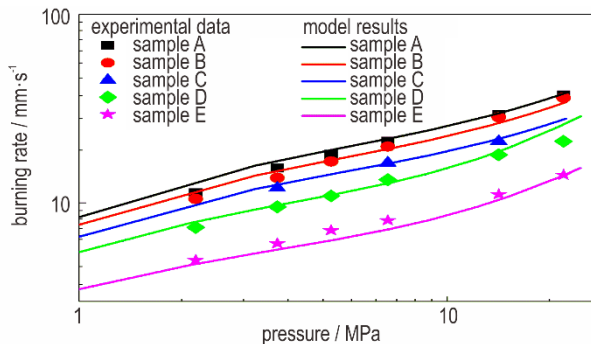


图4 5种AP多级配模型计算结果与实验结果比较

Fig.4 A comparison of between the modeling results and the experimental data for five propellants

于10%,与实验测量结果吻合得较好。同时,从AP粒度配比的涵盖范围来看,包含了实际推进剂中采用的多种粒度分布,具有一定的通用性。因此,可以认为所建立的多级配多火焰稳态燃烧模型是可行的,能较好地反映推进剂配方参数变化的燃速特性,可以进行非稳态压强耦合响应函数的计算工作。

2.2.2 多级配响应函数验证

针对文献[21]中AP三级配AP/HTPB推进剂配方(表2),开展多级配响应函数计算,并与文献中实验结果进行对比,对多级配响应函数模型进行验证。文献采用脉冲触发T型燃烧器实验测量装置,实验测量工作压强约为6.9 MPa,测量频率为400~1300 Hz。因此,AP多级配推进剂响应函数模型的计算工作压强约为6.9 MPa,计算频率范围为200~1300 Hz,AP总含量为87.6%,HTPB含量为12.4%。计算结果如图5所示。

由图5可知,采用粒度分布为400/200/17 μm 的AP三级配推进剂,其粒度配比分别为23.23:34.98:29.15,

表2 AP三级配推进剂配方参数^[21]

Table 2 Formulation of AP Triple modal propellant^[21]

particle size/ μm	AP			HTPB
	17	200	400	
content/%	29.15	34.98	23.23	12.4

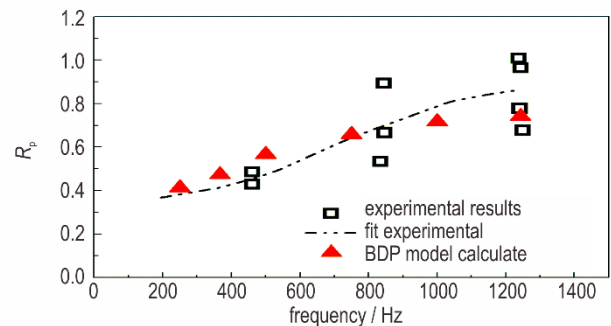


图5 计算模型与实验结果对比验证

Fig.5 A comparison of the predicted and measured Rp values

其响应函数计算结果与实验拟合结果在200~1300 Hz内,基本上吻合得较好,其中振荡频率为250~800 Hz内,响应函数值的误差在5%~9%;而振荡频率约为1200Hz时,模型计算结果与实验拟合结果(黑色虚线)的误差值相对较大,约为14%;但该模型计算结果仍在实验测量值(黑色方框□)的上下限范围内,因此认为模型计算的误差是可接受的。

通过与参考文献中[21]的实验测量值进行比较发现,AP多级配推进剂的压强耦合响应函数计算值与实验测量值之间的误差均小于14%,与实验测量结果吻合较好。可以认为,建立的多级配推进剂压强耦合响应函数计算模型是可行的,能较好地反映出AP多级配推进剂响应函数特性,可以开展AP多级配推进剂响应函数特性的计算研究。

3 计算结果及影响规律

根据实际推进剂中经常采用的四种AP颗粒粒度(330,250,110 μm 和50 μm),通过调整各个粒子含量的配比关系,分别得到AP多粒度级配的AP/HTPB推进剂,通过模型开展稳态和非稳态计算,获得不同的级配和配比条件下各种粒度颗粒对响应函数特性的影响。模型中推进剂仍为双组元AP/HTPB复合推进剂,其中AP含量为80%,平衡工作压强为10 MPa,压强振

荡幅值为平衡压强的20%, 振荡频率为25~1000 Hz。

3.1 AP 粒度对比对燃烧响应的影响规律

为获得330, 250, 110, 50 μm 四种AP粒度中某一粒度含量变化对响应函数影响, 粒度配比变化规则为: AP总含量不变, 一次只改变一种AP粒度的含量(a), 相应其它三种粒度含量同时改变, 计算结果如图6所示。

由图6可知, 不同AP粒度主导变化对响应函数的变化规律有明显的不同。其中图6a中随着330 μm 粒度AP含量的降低, 中低频(<250 Hz)时, 含量从8:1:1:1降低至1:1:1:1时, 响应函数值快速降低, 其中峰值变化最大, 从1.7降低至1.35, 但峰值频率变化不大; 而含量从1:1:1:1降低至0.125:1:1:1时, 响应函数值基本变化不大。对于中高频来说(>250 Hz), 随着含量的降低, 响应函数值增大; 并且频率越大, 响应函数值变化较大。

图6b中, 250 μm 粒度AP含量变化对响应函数的影响基本上与330 μm 相同, 响应函数变化仍在不同频率范围变化不同, 即中低频范围内, 随着 a_{250} 含量降低, 响应函数值下降, 峰值变化从1.56降至1.34; 在中高频范围内, 随着 a_{250} 含量降低, 响应函数值上升。单临界频率约为400 μm , 向高频移动。

图6c中, 在整个频率范围内, 随着 a_{110} 含量降低, 响应函数值均下降; 但不同频率范围内下降的趋势不同, 低频范围内变化趋势较为缓慢, 而高频范围内变化趋势较快。并且随着响应函数值降低, 响应函数峰值频率向低频移动。

图6d中, 以含量1:1:1:1为临界情况, 当 a_{110} 含量>该临界条件时, 在整个频率范围内, 随着 a_{110} 含量降低, 响应函数呈整体型降低的趋势变化; 而当 a_{110} 含量<临界条件时, 随着 a_{110} 含量降低, 响应函数呈区域型变化, 其中中低频范围内响应函数上升, 而中高频范围内, 响应函数下降。 a_{110} 含量的降低, 对于峰值频率向低频移动。

分析认为, 推进剂非稳态燃烧时 $\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$, 即模型

中各个AP颗粒与粘合剂的火焰高度、温度等参数随时间发生周期性的变化。与稳态表达式(5)和(6)相比, 非稳态表达式(8)和(9)多了积分项。该积分项代表了推进剂通过温度和比热所存储的热量, 并需要一定时间来向外界进行释放。这种热释放时间 τ 是决定外界压力扰动对推进剂的燃烧响应的最主要因素, 通常定义为推进剂燃烧的“特征时间”。对于本模型来说, 特征时间有两种: AP分解时间 τ_{AP} 和粘合剂热解时间

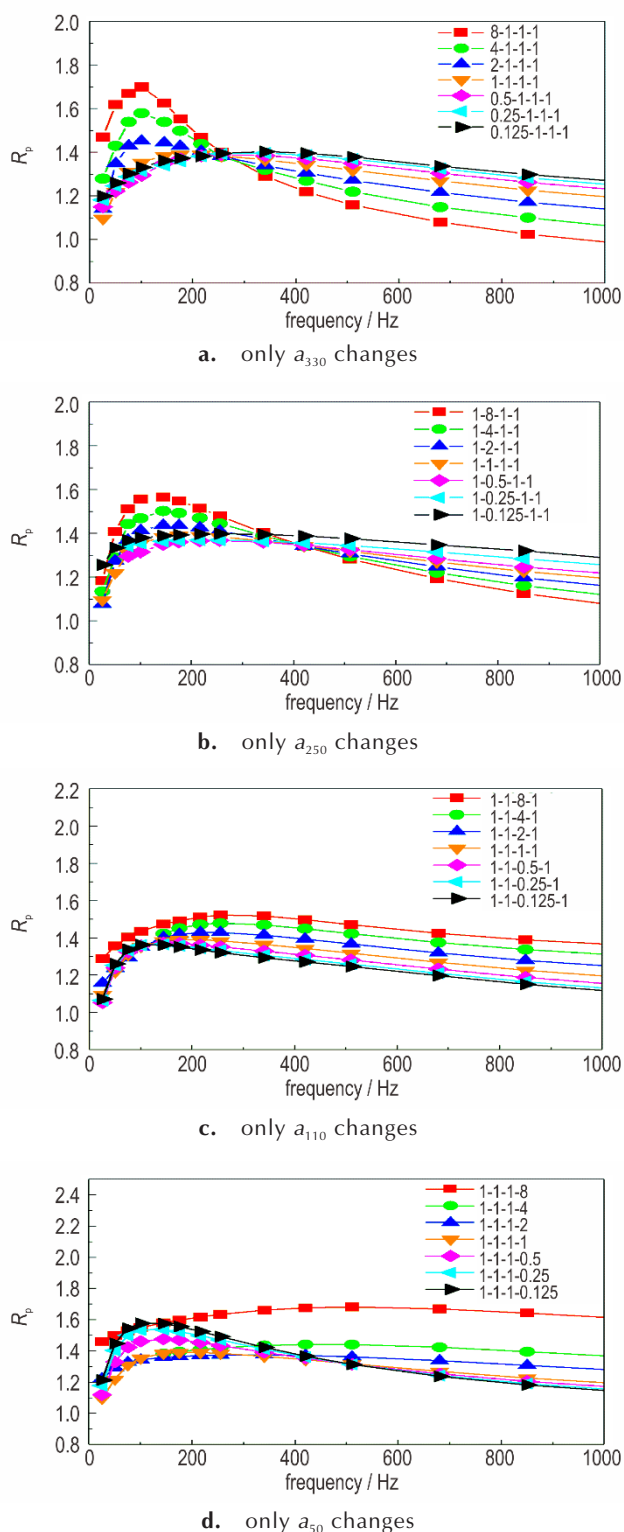


图6 AP四级配单粒度配比变化对响应函数影响(10 MPa)

Fig. 6 Effect of the change of particle content on response function in Quadruplemodal propellants (10 MPa)

τ_b , 一般与各自的热扩散系数 α 和燃速 r 有关, 即 $\tau = \alpha / r^2$ 。在工作压强为10 MPa时, 扩散终焰火焰主要由扩散火焰组成。由文献[7]可知, AP粒度不同, 改变了扩

散火焰高度 x_d (即扩散终焰的变化)。当AP粒度减小时,扩散火焰 x_f 高度降低,AP和粘合剂上方的气相温度梯度增大。如图6所示。相应的对AP颗粒和粘合剂的热反馈量增多,使得AP、粘合剂以及推进剂的质量通量显著增大,对应的燃烧速度增大,相应的特征时间 τ_{AP} 和 τ_b 均将减小,容易与高频振荡发生耦合响应,因此响应函数的峰值频率则应向高频移动,如图8所示。同时,随着AP粒度的减小,燃速增高,推进剂固相的温度梯度变陡,使得非稳态表达式(8)和(9)中积分项影响作用减小,因而响应函数的峰值相应减小,如图9所示。

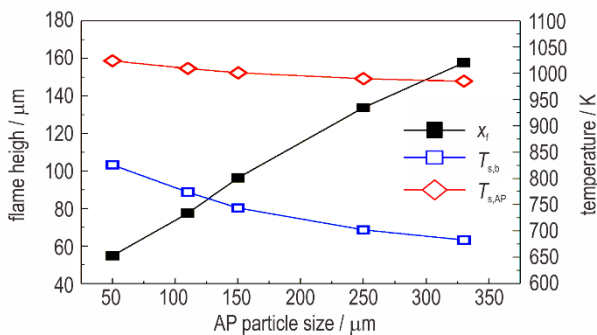


图7 扩散火焰高度与AP、粘合剂表面温度关系(10 MPa)
Fig.7 Change of diffusion flame height and surface temperature of AP and the binder with particle size of AP(10 MPa)

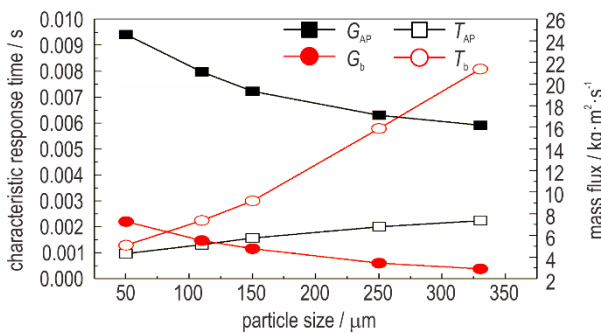


图8 AP和粘合剂的质量通量以及特征时间随AP粒度变化
Fig.8 Change of mass flux and characteristic response time of AP and binder with particle size of AP

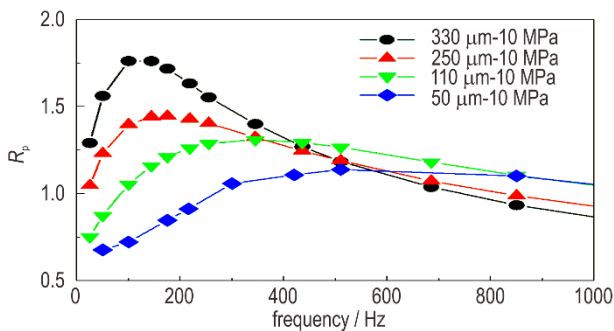


图9 四种AP粒度响应函数分布曲线
Fig.9 Effect of the particle size of AP on R_p

3.2 AP粒度级配对燃烧响应的影响规律

针对双级配110 μm /50 μm 、250 μm /50 μm 和330 μm /50 μm 三种不同AP粒度的双级配推进剂,采用粗细粒度配比为4:1,分别用250 μm 或者330 μm 替代双级配中粗粒度AP的50%含量,而小粒度50 μm 含量保持不变,形成三种AP三粒度级配推进剂,配比为2:2:1。AP粒度级配对响应函数结果如图10所示。

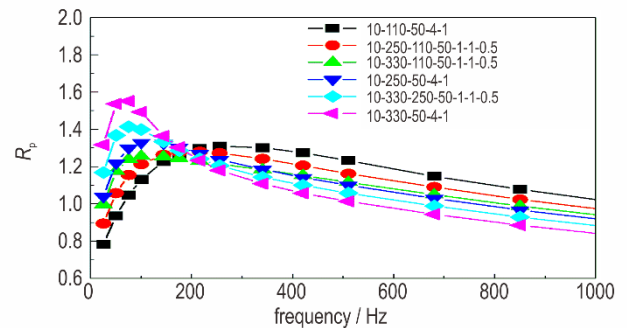


图10 AP粒度级配对响应函数的影响
Fig.10 Effect of the AP modal on R_p

从图10可以看出,在110 μm /50 μm AP双级配推进剂中,当用250 μm 或330 μm AP替代50%的110 μm AP含量时,响应函数在不同频率范围变化不同:小于200 Hz时,随着更大粒度的加入,响应函数增大;大于200 Hz时,则趋势相反。在330 μm /50 μm AP双级配推进剂中,当用250 μm 或者110 μm AP替代50%的330 μm ,响应函数仍是在不同频率范围变化不同:小于200 Hz时,随着更大粒度的加入,响应函数快速降低;大于200 Hz时,趋势相反。对于AP粒度组合250 μm /50 μm 推进剂来说,当用330 μm 或者110 μm AP替代50%的250 μm AP含量时,响应函数的变化趋势完全相反;用大于原有粗粒度AP替代时,响应函数变化规律与110 μm /50 μm AP双级配推进剂变化规律相同;而用小于原有粗粒度AP替代时,响应函数变化规律与330 μm /50 μm AP双级配推进剂结果变化规律相同。

因此,对于AP双级配推进剂来说,用某一不同粒度AP替代双级配中粗粒度含量时,首选需要判断该替换AP粒度与被替换AP粒度大小关系,如果替换AP粒度>被替换AP粒度时,在中低频响应函数呈增大的趋势变化,而在中高频呈降低的趋势变化;如果AP粒度>被替换AP粒度时,响应函数变化规律相反,即在中低频呈下降的趋势变化,而在中高频呈增大的趋势变化。此规律可以同样适用于AP三级配和四级配推进

剂。因此,对于AP粒度级配对响应函数的影响,需要根据AP粒度替代关系进行具体分析,并且在不同的振荡频率条件下,变化规律完全不同。

4 结论

建立了AP多级配的AP/HTPB推进剂燃烧响应模型,针对四种AP粒度330,250,110 μm 和50 μm 组合成的多种AP多级配推进剂,分别研究了响应函数特性,获得了AP粒度配比和粒度级配对响应函数分布的影响规律。主要结论如下:

(1) 建立的AP多粒度多级配燃烧响应模型能较好地反映出AP多粒度多级配推进剂燃烧响应特性,100~1000 Hz内,燃烧响应模型计算结果与文献实验测量结果吻合的较好,误差小于9%。

(2) AP粒度对响应函数分布的影响较大,影响规律基本满足:小粒度增益中高频、抑制中低频,大粒度增益中低频、抑制中高频。即大粒度含量增大,中低频响应函数值增大,中高频响应函数值降低;而细粒度含量增大时,中低频响应函数值降低,中高频响应函数值增大。

(3) AP级配对响应函数分布的响应影响也较大,用中粒度AP替代部分小粒度AP,可以抑制中高频振荡,但同时会增益中低频振荡;用中粒度AP替代大粒度AP时,则结果相反。

参考文献:

- [1] Guo K K, Summerfield M. 固体推进剂燃烧基础(下)[M]. 宋兆武,译.北京:宇航出版社,1988:86-90.
Guo K K, Summerfield M. Solid propellant combustion base(1) [M]. Song Zhaowu, transl. Beijing: Astronautics Pressing House, 1988:86-90.
- [2] 京固群,译. 固体推进剂火箭发动机的基本问题(下册)[M]. 北京:国防工业出版社,1976:225-233.
- [3] Culick F E C. A review of calculations for unsteady burning of solid propellant[J]. *AIAA Journal*, 1968, 6(12):2241-2255.
- [4] Shusser M, Culick F E C. Analytical solution for composite solid propellant response functions[C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, UT, United States, 2001.
- [5] Shusser M, Culick F E C, Cohen N S. Analytical solution for pressure-coupled combustion response functions of composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(5):1058-1067.
- [6] Rasmussen B, Frederick R A. Nonlinear heterogeneous model of composite solid propellant combustion[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(5):1086-1092.
- [7] Beckstead M W, Derr R L, Price C F. A Model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames [J]. *AIAA Journal*, 1970, 8(12): 2200-2207.
- [8] Renie J P, Condon J A, Osborn J R. Oxidizer size distribution effects on propellant combustion[J]. *AIAA Journal*, 1979, 17(8): 877-883.
- [9] Cai W, Thakre P, Yang V. A model of AP/HTPB composite propellant combustion in rocket-motor environments[J]. *Combustion Science and Technology*, 2008,180: 2143-2169.
- [10] Cai W, Thakre P, Yang V. Transient combustion of AP/HTPB composite propellant to acoustic oscillations in a rocket motor [J]. *Combustion Science and Technology*, 2009, 181: 597-617.
- [11] Jackson T L. Modeling of heterogeneous propellant combustion: a survey [J]. *AIAA Journal*, 2012,5(5): 993-1006.
- [12] RENIE J, OSBORN J. Pressure and velocity coupled response of composite solid propellants based upon a small perturbation of analysis [C]//17th Joint Propulsion Conference, Colorado Springs, CO, United States, 1981.
- [13] 周志清,梁伟,刘雪梅,等.基于复杂气相机制的AP/HTPB三明治推进剂燃烧数值分析[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(5): 637-653.
ZHOU Zhi-qing, LIANG Wei, LIU Xue-mei, et al. Numerical analysis on combustion of AP/HTPB sandwich propellant based on complex gas kinetics [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(5): 637-653.
- [14] 赵瑜,鲍福廷,胡志伟,等. AP/HTPB复合推进剂燃烧的详细化学动力学建模[J]. 固体火箭技术, 2012, 34(3): 311-318.
ZHAO Yu, BAO Fu-ting, HU Zhi-wei, A combustion model for AP /HTPB composite propellant using detailed chemical kinetics[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 34(3): 311-318.
- [15] 张炜,朱慧,刘文元. AP/RDX/HTPB复合推进剂燃速特性计算研究[J]. 推进技术, 1997, 18(4): 75-79.
ZHANG Wei, ZHU Hui, LIU Wen-yuan. Calculation study on burning rate characteristics of AP/RDX/HTPB propellants [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(4): 75-79.
- [16] 彭培根,刘德辉.高氯酸铵/硝胺推进剂燃烧模拟[J].推进技术, 1990, 11(4): 63-70.
PENG Pei-gen, LIU De-hui. AP/Nitramine propellant combustion simulation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1990, 11(4):63-70.
- [17] 刘佩进,齐宗满,金秉宁.两种含铝复合推进剂压强耦合响应的实验对比[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1): 83-88.
LIU Pei-jin, QI Zong-man, JIN Bing-ning. Experiment comparison of pressure coupled response of the aluminized composite propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(1): 83-88.
- [18] Cohen N S. Review of composite propellant burning rate modeling[J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(3): 277-293.
- [19] Baum J D, Daniel B R, Zinn B T. Determination of solid propellant admittances by the impedance tube method [J]. *AIAA Journal*, 1981, 19(2): 214-220.
- [20] 孙迪,刘佩进,刘林林,等.基于BDP模型的AP/HTPB推进剂燃速参数敏感性分析[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2).
SUN Di, LIU Pei-jin, LIU Lin-lin. Parameter sensitivity analysis on the burning rate of AP/HTPB composite solid propellant based on the BDP model [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(2).
- [21] Harris P, de Champlain A, Bourque C, et al. Pulse-triggered nonlinear instability in solid rocket motors—An experimental study [C]//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, United States, 1997.

Unsteady Combustion Response Model of Multi-modal Ammonium Perchlorate Composite Propellant

JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, XU Guan-yu

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

Abstract: In order to clarify the effect of multi-modal ammonium perchlorate (AP) on combustion responses characteristics of AP/Hydroxyl polybutadiene (HTPB) composite propellants, the unsteady combustion response (Rp) model of multi-modal AP composite propellant has been established and calibrated. Under 10 MPa and 25–1000 Hz conditions, more than 10 types of AP-based propellant samples containing AP with four typical average particle sizes (330, 250, 110 μm and 50 μm) have been used to calculate the characteristics of the combustion response. The effects of the AP modal and mass ratio on combustion response function have been analyzed. The results show that: 1) the Rp model calculation results are in good agreement with experimental results reported in the literature (pressure >5 MPa), deviation <9%; 2) the AP particle modal and mass ratio have great effects on the combustion response function, and law is basically satisfied, showing that the increased content of small-sized AP or reduced the content of large-size AP could reduce medium and low frequency oscillation, but meanwhile it would drive higher frequency oscillation; 3) Replacement of small-sized AP with medium-sized AP can reduce medium and high frequency oscillation. Conversely, the replacement of the large-size AP with medium-size AP can reduced low frequency oscillation.

Key words: combustion instability; solid propellant; ammonium perchlorate (AP) particle modal; combustion response model

CLC number: V435

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019017

(责编:高毅)