

隔板喷嘴对燃烧室切向声学模态作用研究*

刘旺, 李敬轩, 杨立军

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘要: 隔板喷嘴通过改变燃烧室声学特性, 在抑制火箭发动机高频燃烧不稳定性方面具有重要作用。然而, 目前并没有合适的理论模型, 来预测隔板喷嘴对燃烧室声学特性的作用规律。为了获得隔板喷嘴对燃烧室内切向声学振荡模态作用的理论模型, 通过理论推导隔板喷嘴声导纳, 利用分离变量法结合实验验证, 研究了径向隔板喷嘴间隙、数量及长度对燃烧室一阶切向声学振荡模态的影响。结果表明, 存在最佳隔板喷嘴间隙, 对燃烧室内一阶切向声学振荡模态抑制效果最佳; 随着隔板喷嘴数量或长度的增加, 燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率和幅值均呈现下降趋势, 且弱化了隔板喷嘴间隙的作用效果。该模型为隔板喷嘴研究奠定了一定的理论基础, 研究结果为火箭发动机隔板喷嘴设计提供指导。

关键词: 隔板喷嘴; 燃烧不稳定性; 理论模型; 声导纳; 切向声学振荡模态

中图分类号: V434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 06-1348-06

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 180362

Effects of Baffled Injectors on Transverse Acoustic Mode in a Combustor

LIU Wang, LI Jing-xuan, YANG Li-jun

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Baffled injectors have played an important role in suppressing high-frequency combustion instability in liquid rocket engines by changing acoustic characteristics of the combustion chamber. However, no appropriate model can successfully predict effects of baffled injectors on acoustic characteristics of a combustion chamber. In order to obtain the theoretical model of effects of baffled injectors on the transverse acoustic mode of the combustion chamber, the acoustic admittance of baffled injectors was deduced theoretically. Effects of gap, number and length of baffled injectors on the first transverse mode of the combustion chamber were studied by means of separation variable method and experiment. Results show that the maximum suppression effects on the first transverse acoustic mode occurs at a certain gap. The frequency and amplitude of the first transverse acoustic mode decrease with increasing the number and length of baffled injectors. Furthermore, suppression effects of gap are weakened with the increasing of number or length of baffled injectors. This model lays a theoretical foundation for the study of baffled injectors, and results offer some guidance to the design of baffled injectors in liquid rocket engines.

Key words: Baffled injectors; Combustion instability; Theoretical model; Acoustic admittance; Transverse acoustic mode

* 收稿日期: 2018-06-14; 修订日期: 2018-11-01。

基金项目: 北京航空航天大学拔尖人才支持计划 (KG12052301)。

作者简介: 刘旺, 硕士生, 研究领域为燃烧不稳定性控制。E-mail: w_liu0297@buaa.edu.cn

通讯作者: 杨立军, 博士, 教授, 研究领域为燃烧不稳定性。E-mail: yanglijun@buaa.edu.cn

1 引言

火箭发动机工作过程中经常出现燃烧不稳定性现象,进而造成极高的传热效率和剧烈的机械振荡,引起喷注面板烧蚀或燃烧器机械结构破坏,影响整个动力系统正常工作,甚至发生爆炸^[1-2]。因此,燃烧不稳定性控制成为火箭发动机研制过程中重大技术关键之一。研究发现,当发生燃烧不稳定性现象时,燃烧的非定常热释放与燃烧室声学特性极易耦合而引起共振,这将激励燃烧室内压强振荡,并反馈给燃烧反应,加剧燃烧不稳定性现象^[3-4]。因此,开展燃烧室声学特性研究,对理解燃烧不稳定性机理,抑制火箭发动机内燃烧不稳定性现象具有重要意义。

研究发现,一阶切向高频燃烧不稳定性出现最频繁、破坏性最大。径向隔板或隔板喷嘴能改变燃烧室声学特性,将切向声学振荡转换为更易耗散的纵向声学振荡模态,工程上多用来抑制切向高频燃烧不稳定性^[1-5]。然而,隔板迫使燃烧分区,造成燃烧的不连续性,降低了推进剂的燃烧效率,同时对隔板热防护提出了苛刻要求^[6]。为解决隔板安装带来的问题,隔板喷嘴被广泛应用。隔板喷嘴由延伸到燃烧室的喷嘴构成,推进剂由隔板喷嘴进入燃烧室进行燃烧反应,提高了燃烧效率,并且低温推进剂能够对其进行冷却^[6]。因此,国内外学者对隔板喷嘴对燃烧室切向声学振荡模态的作用进行了大量研究。

Park等^[6-7]利用数值和实验方法,研究了粘性效应下隔板喷嘴的声学特性,获得了隔板喷嘴的吸声系数。研究发现,常温常压下当隔板喷嘴间隙约为0.1mm~0.2mm时,对声学阻尼的效果最佳,最佳间隙随着气体粘性的增加而增加,然而数值仿真和实验结果误差较大。Lee等^[8]利用冷态声学实验,对隔板喷嘴结构参数对圆柱形燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率和振幅的影响进行了研究。研究表明,当隔板喷嘴间隙约为0.1mm~0.2mm时燃烧室内声学振荡振幅最小,称为最佳隔板喷嘴间隙,且隔板喷嘴长度越长,声学阻尼效果越好。

李龙飞等^[9]对隔板喷嘴抑制液氧煤油补燃发动机高频燃烧不稳定性问题进行了研究,当隔板喷嘴间隙为0.2mm左右时,对声波的阻尼效果最佳。李丹琳等^[10]实验研究了隔板喷嘴间隙对燃烧室声学特性的影响,获得最佳隔板喷嘴间隙约为0.1mm~0.4mm。郭灿琳等^[11]利用吸声系数研究了隔板喷嘴对声波的耗散机理,当隔板喷嘴选择合适的喷嘴间隙时,能够提供更大的能量耗散。Guo等^[12]数值模拟

了粘性效应下隔板喷嘴的吸声效果。结果表明,径向隔板喷嘴能够抑制切向不稳定燃烧,且尝试给出粘性是影响隔板喷嘴吸声的重要因素。

总结发现,隔板喷嘴对燃烧室切向声学模态作用的研究,大多局限于实验和数值模拟方法。然而,实验方法对测试环境和实验操作人员要求较高,实验成本较高;数值模拟由于结构离散化形式不同,造成随机性较大,可信度比较差。如果能够获取隔板喷嘴对燃烧室切向声学振荡模态作用的理论模型,将大大节约燃烧不稳定性预测和控制计算时所需要的计算资源,同时可以快速设计出合适的隔板喷嘴结构。因此,本文建立了隔板喷嘴对燃烧室切向声学模态作用模型。

2 方法

2.1 物理模型

如图1所示,将径向隔板喷嘴安装在圆柱形燃烧室头部,由于穿过隔板喷嘴间隙的流速非常低,在声学处理中经常忽略热粘性作用,因此本文在研究中也忽略了热粘性作用,同时忽略喷管收缩段的影响。模型中 a 代表隔板喷嘴直径, b 代表相邻隔板喷嘴间隙, L_b 代表隔板喷嘴长度, R 代表圆柱形燃烧室半径, L 代表燃烧室长度。

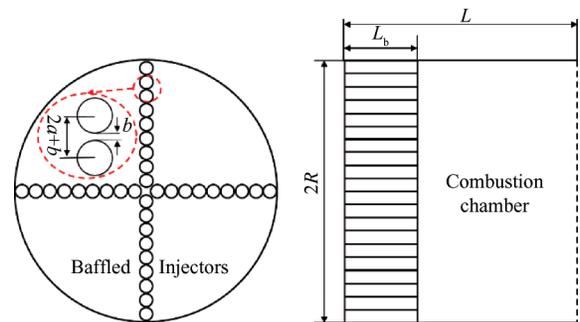


Fig. 1 Schematic of baffled injectors in a chamber

Yang等^[13-14]采用分离变量法,从隔板声导纳角度,成功预测了隔板数量、长度对燃烧室一阶切向声学振荡模态的影响。因此,本文尝试将该方法应用于隔板喷嘴对燃烧室切向声学振荡模态作用研究。隔板喷嘴将燃烧室分成隔板喷嘴区和主燃烧室区,采用分离变量法,分别求得隔板喷嘴区和主燃烧室区的压力和速度扰动,利用两区之间的参数匹配关系(压力和速度扰动相等)和隔板喷嘴声导纳作为边界条件,即可获得隔板喷嘴的声学特性规律。因此,本文旨在建立隔板喷嘴声导纳理论模型。

本文将喷嘴简化为无限长刚性圆柱,隔板喷嘴

简化为任意刚性圆柱排,如图2所示,其中圆柱半径为 a ,相邻圆柱间隙为 b ,忽略气体粘性与流动。假设任意平面声波垂直投射到刚性圆柱排,在表面发生散射作用,则空间中任意 M 点声导纳求解过程如下。

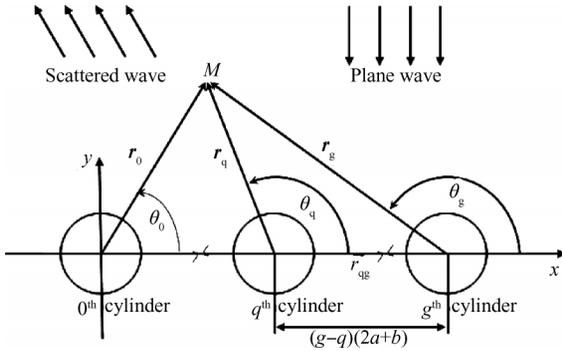


Fig. 2 Sketch for acoustic admittance of baffled injectors

以第 g 圆柱为基准,任意平面声波为

$$p_i = e^{j\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n J_n(kr_g) e^{jn\theta_g} \quad (1)$$

平面声波经圆柱排散射后,其散射波形式如下

$$p_s = e^{j\omega t} \sum_{q=0}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(q)} H_n^{(1)}(kr_q) e^{jn\theta_q} \quad (2)$$

式中 J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数, k 为波数, c 为声速, ω 为角频率, $H_n^{(1)}$ 为 n 阶第一类汉克尔函数, q 为圆柱序号, M 为圆柱总数, $A_n^{(q)}$ 为散射波系数。

根据刚性边界条件

$$\left. \frac{\partial(p_i + p_s)}{\partial r_g} \right|_{r_g=a} = 0 \quad (3)$$

将方程(1)和(2)代入到方程(3),利用叠加原理^[15],整理可得

$$A_m^{(g)} - D_m^{(g)} \sum_{q=0}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(q)} Z_{n-m} = (-j)^m D_m^{(g)} \quad (4)$$

式中

$$Z_{n-m} = \begin{cases} H_n^{(1)}[k(g-q)(2a+b)], & q < g \\ H_n^{(1)}[k(g-q)(2a+b)]e^{j(n-m)\pi}, & q > g \end{cases} \quad (5)$$

$$D_m^{(g)} = -\left. \frac{dJ_n(kr)}{dr} \right|_{r_g=a} / \left. \frac{dH_n^{(1)}(kr)}{dr} \right|_{r_g=a} \quad (6)$$

当圆柱足够多时,散射系数将独立于圆柱,即 $A_m^{(q)} = A_m$;同时散射波轴对称于刚性圆柱,即 $A_{-m} = A_m$ 。当仅考虑低阶散射声波时:

$$A_0 = \frac{D_0[1 - D_2(Z_0 + Z_4 + 2Z_2)]}{(1 - D_0Z_0)[1 - D_2(Z_0 + Z_4)] - 2D_0D_2Z_2^2} \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{jD_0[D_3(Z_0 + Z_2 + Z_6 - Z_4) - 1]}{[1 - D_1(Z_0 + Z_2)][1 - D_3(Z_0 + Z_6)] - D_1D_3(Z_2 + Z_4)^2} \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{D_2[D_0(Z_0 + Z_2) - 1]}{(1 - D_0Z_0)[1 - D_2(Z_0 + Z_4)] - 2D_0D_2Z_2^2} \quad (9)$$

$$A_3 = \frac{jD_3[1 - D_1(Z_0 + Z_4 + 2Z_2)]}{[1 - D_0(Z_0 + Z_2)][1 - D_3(Z_0 + Z_6)] - D_1D_3(Z_2 + Z_4)^2} \quad (10)$$

其中 Z_{n-m} 为施勒米希级数, Tversky^[16]给出了其解析表达式。由此,确定了平面声波经刚性圆柱排散射后的散射系数 A_n 。本文将任意圆柱排散射模型退化为两个圆柱,并与 Row^[17]所做实验进行对比,图3为理论模型与实验对比图,验证了上述理论模型的正确性。

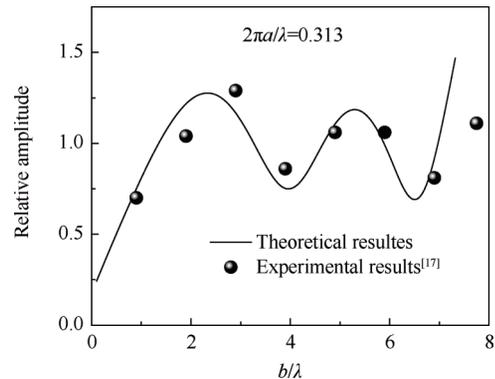


Fig. 3 Relative amplitude as functions of b/λ

则隔板喷嘴声导纳为

$$A = \frac{u_s/c}{p_s/\gamma p_0} \quad (11)$$

式中 u_s 为散射波速度, p_s 为散射波声压, γ 为比热比, p_0 为平均声压。

2.2 实验系统

为了验证隔板喷嘴对燃烧室切向声学模态作用的理论模型,搭建了径向隔板喷嘴对燃烧室切向声学模态作用的冷态声学实验系统,如图4所示。实验中,计算机输出特定频率的正弦或余弦信号,通过数据采集卡(PCI-3364)经功率放大器(XM4080),驱动周向均匀分布的4个扬声器(SeasH1396-04)(呈90°排列),产生特定频率的切向声波,声波经隔板喷嘴作用后,由周向均匀分布的8个传声器(MP201)(呈45°排列)接受声波信号,经数据采集卡输入到计算

机,处理实验数据即可获得隔板喷嘴对燃烧室内一阶切向声学振荡频率和幅值的影响规律。

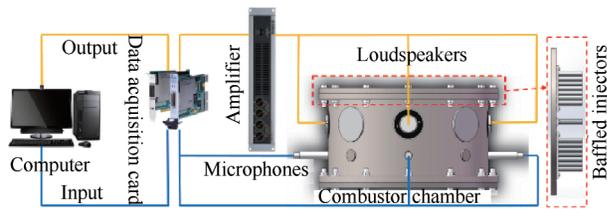
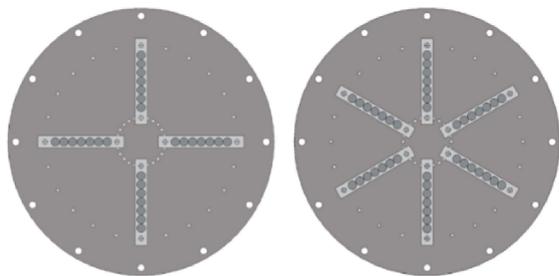


Fig. 4 Experimental setup for acoustic tests

实验中,将径向隔板喷嘴安装在圆柱形燃烧室头部,燃烧室采用 304 不锈钢材料制成,其长度为 150mm,内直径为 250mm,壁厚为 10mm。隔板喷嘴采用金属铝制成,其长度为 50mm,直径为 10mm,相邻隔板喷嘴间隙为 0~1.0mm(间隔 0.2mm),径向隔板喷嘴数量为 4 块和 6 块(呈均匀排列方式),其排列方式如图 5 所示。



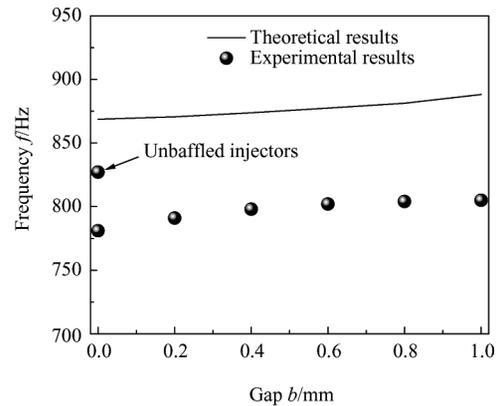
(a) Baffle number $N=4$ (b) Baffle number $N=6$

Fig. 5 Arrangement of baffled injectors

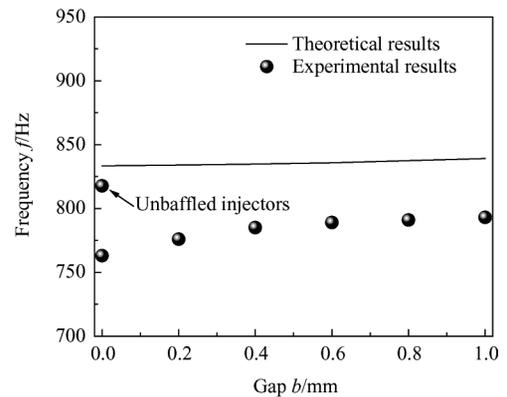
3 结果与讨论

3.1 隔板喷嘴间隙的影响

图 6 展示了隔板喷嘴间隙对燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率的影响。实验结果表明,隔板喷嘴相对于纯隔板,能有效降低燃烧室一阶切向声学振荡模态频率,并随着隔板喷嘴间隙的增加,燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率呈现增加趋势。理论与实验结果对比可知:隔板喷嘴对燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率影响趋势吻合较好,由于实验过程中,实验装置并非绝对刚性材料,实验装置之间并非绝对密封,造成实验过程中难免出现声音泄露现象,同时实验系统的抗外界干扰能力也相应减弱,且理论模型中忽略了热粘性,使得理论值略大于实验值,最大误差在 10% 以内。后续的研究过程中,将对实验系统和操作方法加以优化改进,并在理论模型考虑热粘性效应。



(a) Baffle number $N=4$



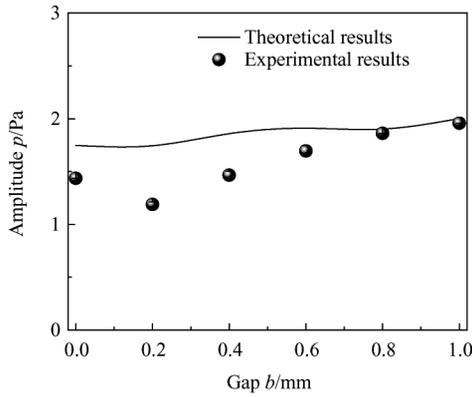
(b) Baffle number $N=6$

Fig. 6 Effects of gap on frequency of the first transverse mode

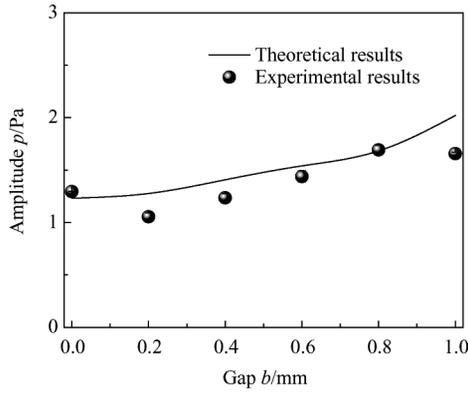
图 7 展示了隔板喷嘴间隙对燃烧室内一阶切向声学振荡模态幅值的影响。实验结果表明,存在最佳隔板喷嘴间隙为 0.2mm 左右时,使得燃烧室内一阶切向声学振荡模态幅值最小,表明隔板喷嘴间隙在 0.2mm 左右时对切向振型抑制效果最好。理论结果表明,燃烧室内一阶切向振荡声学模态振荡幅值随隔板喷嘴间隙单调变化,当隔板喷嘴间隙较小时,理论结果与实验结果误差较大。这是因为瑞利在研究细管内声波的传播过程时,发现当细管直径较小时,热粘性耗散效应明显甚至起到主导作用^[18]。而本文在求解连续方程、动量方程、能量方程和状态方程的过程中,将压力、密度、速度等参量视为小扰动,燃烧室内声波速度远大于质点振荡速度,因此整个过程变为了等熵过程,此时隔板喷嘴表面粘性耗散无法体现^[9]。

3.2 隔板喷嘴数量的影响

图 8 为隔板喷嘴数量对燃烧室一阶切向声学振荡模态频率和振幅的影响。结果表明,燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率和幅值,随着隔板喷嘴数量增加呈现下降趋势。当隔板喷嘴间隙为 0.4mm

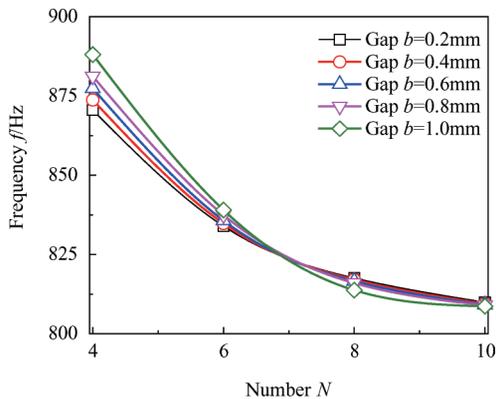


(b) Baffle number $N=4$

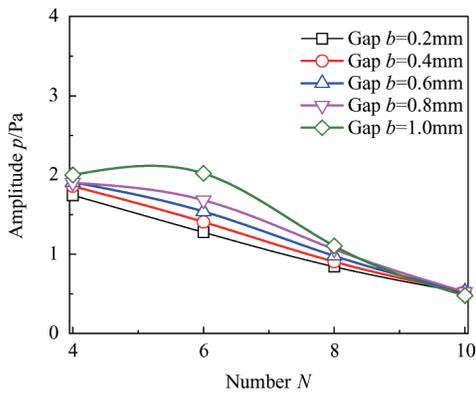


(b) Baffle number $N=6$

Fig. 7 Effects of gap on amplitude of the first transverse mode



(a) Frequency



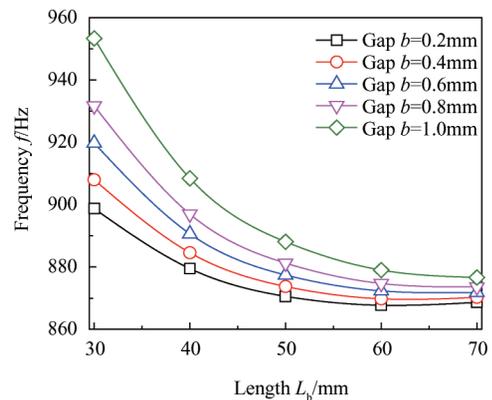
(b) Amplitude

Fig. 8 Effects of number on the first transverse mode

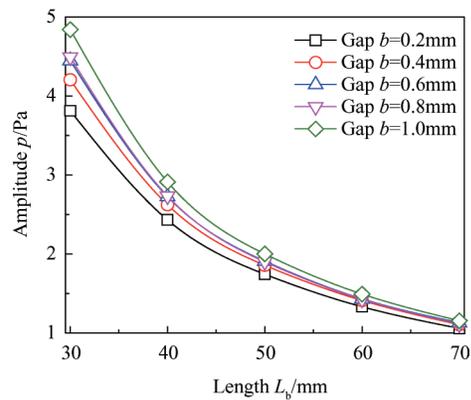
时,安装4块、6块和8块径向隔板喷嘴时,燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率分别为 873.76Hz, 834.77Hz 和 817.10Hz,燃烧室内一阶切向声学振荡模态幅值分别 1.8585Pa, 1.4074Pa 和 0.9050Pa。隔板喷嘴数量从4块变为8块时,燃烧室一阶切向声学振荡模态频率降低了6.48%,燃烧室一阶切向声学振荡模态幅值降低了51.3%。这是因为径向隔板喷嘴将燃烧室内一阶切向声学振荡模态,转换成了频率较低、振荡较弱的纵向振荡模态,径向隔板数量越多,燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率和幅值越低,对燃烧不稳定性的抑制效果越好。但是,随着隔板数量增加,一阶切向声学振荡模态频率变化速率变慢。同时发现,随着隔板喷嘴数量增加,隔板喷嘴间隙对一阶切向声学振荡模态响应特性变窄,即增加隔板喷嘴数量弱化了隔板喷嘴间隙的作用效果。

3.3 隔板喷嘴长度的影响

图9为隔板喷嘴长度对一阶切向声学振荡模态频率和振幅的影响,隔板数量为4块。结果表明,随着隔板喷嘴长度增加,燃烧室内一阶切向声学振荡模态频率和振幅均呈现下降趋势。这是因为隔板喷嘴长度越长,对燃烧室内一阶切向声学振荡模态的



(a) Frequency



(b) Amplitude

Fig. 9 Effects of length on the first transverse mode

纵向化作用越明显。同时发现,当隔板喷嘴长度为30mm,隔板喷嘴间隙从0.2mm到1mm,燃烧室一阶切向声学振荡模态频率降低了5.73%,一阶切向声学振荡模态幅值降低了21.22%;当隔板喷嘴长度为70mm,隔板喷嘴间隙从0.2mm到1mm,燃烧室一阶切向声学振荡模态频率降低了0.91%,一阶切向声学振荡模态幅值降低了8.31%。表明增加隔板喷嘴长度弱化了隔板喷嘴间隙的作用效果。

4 结 论

在未考虑热粘性条件下,本文通过理论推导与实验验证,研究了火箭发动机隔板喷嘴间隙、数量及长度对燃烧室一阶切向声学振荡模态频率和振幅的影响,主要结论如下:

(1)建立了隔板喷嘴声导纳模型,并通过实验验证了该模型的正确性。

(2)实验表明,存在最佳隔板喷嘴间隙,使得燃烧室内一阶切向声学振荡模态幅值最低,对燃烧不稳定性的抑制效果最好。

(3)随着隔板喷嘴数量或长度增加,一阶切向声学振荡模态频率和幅值均呈现下降趋势,即增加隔板喷嘴数量或长度,对燃烧室内一阶切向高频不稳定燃烧的抑制效果增强。同时发现,增加隔板喷嘴数量或长度,弱化了隔板喷嘴间隙的作用效果。

然而本文理论模型并未考虑热粘性效应,这将在后续的工作进行深入研究。

致 谢:感谢北京航空航天大学拔尖人才支持计划资助。

参考文献:

- [1] Harje D J, Reardon F H. Liquid Propellant Rocket Combustion Instability[R]. NASA-SP-194, 1972.
- [2] Culick F E C, Yang V. 液体火箭发动机燃烧不稳定[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [3] 杨国才. F/A-18E/F飞机发动机的Caret进气道[J]. 推进技术, 1997, 18(4): 31-35. (YANG Guo-cai. The Caret Inlet of the F/A-18E/F Strike Fighter[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(4): 31-35.)
- [4] Dranovsky M L, Yang V, Culick F E C, et al. Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines: Testing and Development Practices in Russia[C]. Reston: Progress in Astronautics and Aeronautics, 2007.
- [5] 杨立军, 富庆飞. 液体火箭发动机推力室设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2013.
- [6] Park I S, Sohn C H, Kim H J. Acoustic Damping Enhanced by Gaps in Baffled Injectors in an Acoustic Chamber[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(12): 2747-2757.
- [7] Park I S, Sohn C H. A Numerical Study on Acoustic Damping Mechanism of Baffled Injectors in an Acoustic Chamber[C]. Nashville: 46th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2010.
- [8] Lee K J, Kim H J, Seo S, et al. Experimental Verification for Acoustic Damping Enhancement by Gaps in Baffled Injectors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 435-442.
- [9] 李龙飞, 陈建华, 刘站国. 大推力液氧煤油补燃发动机高频燃烧不稳定性的控制方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2011, 313(3): 16-19.
- [10] 李丹琳, 田 原, 孙纪国. 隔板对燃烧室声学特性的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 715-719.
- [11] 郭灿琳, 卢 钢, 陈建华, 等. 喷嘴式隔板与纵向肋式隔板阻尼效应分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 32-37.
- [12] Guo K K, Nie W S, Liu Y, et al. Numerical Simulation of Damping Capacity Between Injector Formed Baffle and Normal Blade Baffle in a Kero/LOX Liquid Rocket Engine [C]. USA: Advances in Engineering Research, 2017.
- [13] Wicker J M, Yoon M W, Yang V. Linear and Non-linear Pressure Oscillations in Baffled Combustor Chambers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 184(1): 141-171.
- [14] You D, Huang Y, Yang V. Linear Stability Analysis of Baffled Combustor Chamber with Radial and Circumferential Blades [C]. Reno: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [15] Martin P A, Flajolet P, Ismail M E H, et al. Multiple Scattering Interaction of Time Harmonic Waves with N Obstacles[M]. Cambridge: Multiple Scattering, 2006.
- [16] Tversky V T. On Scattering of Waves by the Infinite Grating of Circular Cylinders[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, 10(6): 737-765.
- [17] Row R V. Electromagnetic Scattering from Two Parallel Conducting Cylinders [D]. Boston: Harvard University, 1953.
- [18] Rayleigh L. The Theory of Sound [M]. New York: Dover Publication, 1945.

(编辑:梅 瑛)