



陕西出版资金精品项目

专著

ZHUANZHU

燃烧不稳定性模拟实验技术

张蒙正 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

RANSHAO BUWENDINGXING MONI SHIYAN JISHU

燃烧不稳定性模拟实验技术

张蒙正 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书讲述了液体火箭发动机燃烧不稳定性模拟实验的原理、方法及作用,以期读者能对燃烧不稳定性实验研究方法有一个比较系统的了解。

本书共9章,内容涉及喷注器的雾化、混合和声学特性研究,单喷注器燃烧室和全尺寸头部燃烧室低压燃烧模拟实验研究,缩比发动机和实际发动机热试车研究等。

本书可供从事液体火箭发动机研究和设计的科研和技术人员参考,也可供航空发动机相关专业工程和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧不稳定性模拟实验技术/张蒙正著. —西安:西北工业大学出版社,2017.4

ISBN 978-7-5612-5312-0

I. ①燃… II. ①张… III. ①液体推进剂火箭发动机—不稳定燃烧—模拟实验
IV. ①V434-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090134 号

策划编辑:华一瑾

责任编辑:付高明

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:14.75

字 数:309千字

版 次:2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷

定 价:68.00元

前 言

燃烧不稳定性一直是液体火箭发动机研制中最具挑战性的问题,它与发动机循环方式、使用的推进剂、喷注器和燃烧室设计等密切相关,同时也受发动机工作环境和生产工艺等诸多因素的影响。20 世纪 40 年代以来,作为工程攻关项目、学术探索目标及理论研究课题,燃烧不稳定性一直受到有关研究人员和工程技术人员的极大关注,并得到广泛而深入的研究。

燃烧不稳定性的研究方法包括理论研究、数值仿真、模拟实验及发动机试车等。其中,模拟实验具有研究机理和指导工程设计两方面的作用,且廉价、安全,是很有前途的研究燃烧不稳定性的途径和方法。

本书以液体火箭发动机燃烧不稳定性的实验研究为主线,比较详细地介绍液体火箭发动机喷注器雾化和混合特性,喷注器和燃烧室声学特性,单喷注器燃烧室和全尺寸燃烧室低压燃烧模拟实验,缩比燃烧室和实际发动机试车等实验技术的原理、方法和在不稳定性燃烧研究中的作用,以期读者能对燃烧不稳定性的模拟实验研究方法有一个比较系统的了解。全书分为 9 章,第 1 章介绍燃烧不稳定性的研究方法和主要步骤;第 2~7 章介绍 1989 年以来笔者负责和参与建设的激光全息雾化实验系统,高速动态特性分析系统、收集法的混合比特性测量系统、激光荧光混合比特性实验系统、单喷注器声学特性实验系统、单喷注器燃烧室和全尺寸头部燃烧室低压燃烧模拟实验系统等不同实验系统的原理、方法及其作用;第 8 章介绍国外应用的缩尺模拟实验技术的原理和作用;第 9 章介绍俄罗斯燃烧不稳定性鉴定技术原理和作用。

衷心感谢航天推进技术研究院及西安航天动力研究所的领导和专家们,正是他们的高瞻远瞩,通过 10 余年的努力,西安航天动力研究所逐步建成了液体火箭发动机雾化、混合、声学 and 燃烧不稳定性实验系统;也正是在他们的指导下,此项工作才取得了一些成绩。

衷心感谢西安航天动力研究所原所长李斌研究员对本书给予的指导和支持。

衷心感谢西北工业大学航天学院汪亮教授。在本书的编著过程中,汪教授给予了全面的指导,并承担了审稿工作。衷心感谢北京航空航天大学杨立军教授和西安航天动力研究所同事们的支持和帮助。

感谢西安航天动力研究所旷武岳同志给予的帮助和支持。

需要说明的是,任何模拟实验都无法模拟全部的物理和化学过程,且模拟实验结果的验证

也存在很大的困难。同时,不同研究单位和研究人员对模拟实验的原理、途径、实验方法及其实用性也存在不同的观点。本书介绍的模拟实验技术同样存在一些不足。笔者才疏学浅,加之研究经验有限,书中不足之处在所难免,敬请读者,尤其是同行批评指正。

著 者

2016 年 5 月

目 录

第 1 章 燃烧不稳定性研究概述	1
1.1 燃烧不稳定性的研究方法及其作用	1
1.2 燃烧不稳定性的研究流程	7
第 2 章 喷注器雾化特性实验	10
2.1 概述	10
2.2 雾化特性的表征	11
2.3 雾化特性实验系统	13
2.4 雾化特性测量技术	31
2.5 雾化研究的展望	57
第 3 章 混合和燃烧特性实验	59
3.1 概述	59
3.2 混合比特性的表征	60
3.3 收集法	61
3.4 荧光法	64
3.5 激光诱导荧光技术	65
3.6 喇曼散射	73
3.7 混合比分布及燃烧特性研究的展望	73
第 4 章 燃烧室声学特性模拟实验	75
4.1 概述	75
4.2 燃烧室的声学特性	75
4.3 声学特性模拟实验的原理	79

4.4	声学特性实验系统及方法	82
4.5	燃烧室声学特性模拟实验及其应用	85
4.6	喷注器声学特性模拟实验及其应用	92
第5章	高频燃烧不稳定性低压燃烧模拟实验的原理	100
5.1	概述	100
5.2	高压补燃循环液体火箭发动机燃烧过程研究	100
5.3	低压燃烧模拟实验的相似分析	110
5.4	低压燃烧模拟实验准则选取及结果的表述	116
第6章	单喷注器燃烧室高频燃烧不稳定性低压燃烧模拟实验及应用	119
6.1	概述	119
6.2	模拟实验的关键参数	119
6.3	喷注器和燃烧室参数换算	124
6.4	模拟实验系统和方法	134
6.5	实际燃烧室模拟实验	137
6.6	声学特性模拟实验与低压燃烧模拟实验的关系	149
第7章	全尺寸头部燃烧室高频燃烧不稳定性低压燃烧模拟实验及应用	150
7.1	概述	150
7.2	模拟实验的原理	151
7.3	模拟实验系统及方法	154
7.4	模拟实验参数及处理	167
7.5	模拟实验结果的表述	180
7.6	模拟实验的应用	181
7.7	低压燃烧模拟实验技术评述	181
第8章	高频燃烧不稳定性缩比实验	183
8.1	概述	183
8.2	二维缩比燃烧室	184
8.3	三维圆柱形缩比燃烧室	185

8.4 其他缩比试件	188
8.5 间歇式调节室压的燃烧室	189
第9章 实际发动机燃烧室燃烧不稳定性实验	192
9.1 概述	192
9.2 燃烧室压力脉动的激励技术	193
9.3 燃烧稳定性的测量和评估	200
9.4 实际发动机燃烧稳定性鉴定实验	208
参考文献	223

第 1 章 燃烧不稳定性研究概述

20 世纪上半叶,液体火箭发动机、固体火箭发动机和涡轮喷气发动机在研制过程中相继出现燃烧不稳定性问题。此后,燃烧不稳定性问题作为工程攻关项目、学术探索目标及理论研究课题一直受到有关研究与工程技术人员的极大关注。通常,类似于声学谐振型振荡,液体火箭发动机燃烧不稳定性可依据频率分为低频、中频和高频燃烧不稳定性。低频燃烧不稳定性主要是燃烧室压力振荡与推进剂供应系统压力振荡相耦合引起的,其振荡频率一般在几百赫兹以下,波长比燃烧室或者供应系统特征尺寸大得多。发生中频燃烧不稳定性时,发动机供应系统压力会出现波动,燃烧室压力也可能波动,但这种压力波动与燃烧室声学振型不相耦合。有的研究文献将喷嘴射流与燃烧室壁面狭窄的反应区相互干涉,产生熵的波动诱发的不稳定性也归于中频燃烧不稳定性。高频燃烧不稳定性是由燃烧室推进剂燃烧反应与燃烧室的声学特性耦合引起的,也称为声学不稳定性。各种燃烧不稳定性的激励机理不同,后果也各异,其中破坏性最大的是高频燃烧不稳定性。一般,当燃烧室中的压力脉动幅值大于平均压力的 10%(也有研究者取 5%)时,就认为产生了燃烧不稳定。否则,视为粗糙燃烧。燃烧不稳定可产生如下负面效应:①流场和化学反应速率随时间变化,可能导致室壁局部热载荷提高,造成结构材料烧蚀或熔化;②脉动性工作可能产生高达 1 000 g 的过载载荷,带来机械破坏;③可能导致发动机性能降低;④给飞行器的精确控制,如推力矢量控制和导航等带来困难。

1.1 燃烧不稳定性的研究方法及其作用

燃烧不稳定性研究涉及推进剂的喷射、雾化、蒸发、混合和化学动力学过程;推进剂流动过程与燃烧过程的耦合;燃烧过程与燃烧室声学特性的耦合等诸多方面。研究方法包括理论研究、数值仿真、模拟和缩比实验研究以及发动机试车考核或稳定性评估等。显然,所有方法涉及多学科,贯穿于发动机研制的全过程。理论研究主要探索燃烧不稳定的产生机理,研究与燃烧不稳定性相关的影响因素;实验研究也涉及理论研究,但本质上是验证理论,侧重的是研究影响不稳定性的主要因素以及消除或抑制燃烧不稳定性的措施;发动机稳定性评估主要是检验具体发动机在偶然激励条件下是否会出现燃烧不稳定性问题,并确定其抗燃烧不稳定性的能力。

1.1.1 理论研究

液体火箭发动机高频燃烧不稳定性理论研究的主要内容之一是研究燃烧室内的能量转换

过程,进而探索高频燃烧不稳定性发生的机理。能量转换过程包括液体推进剂的喷射、雾化、蒸发、混合、燃烧以及气体在喷管中的膨胀与后续的反应等过程。雾化涉及射流撞击、液扇形成、液膜和液丝产生、液滴形成与聚合、液体与气相作用等不稳定过程;蒸发主要涵盖液滴与气相之间的传热、气化和扩散掺混过程;燃烧则包括湍流混合和化学反应等过程。喷注器是燃烧室的关键部件,是推进剂的供应者和燃烧的组织者,其喷射、雾化、混合和燃烧特性是燃烧室能量转换过程的重要环节。几十年来,各国学者和研究人员对液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型和计算方法进行了大量的研究,提出了多种常压、高压和超临界条件下液滴蒸发与燃烧模型,液滴着火和熄火模型,液滴破碎、碰撞和聚合模型,液滴群的蒸发燃烧模型、喷雾两相湍流的燃烧模型等^[1],也建立了一些燃烧不稳定性分析模型^[2-5]。研究结果表明,喷射、雾化、蒸发、混合和化学反应等过程都是液体火箭发动机燃烧室能量转换过程的环节之一,每一个过程都包含了激发高频燃烧不稳定性的可能因素,同时也均有可能在某种条件下成为激发高频燃烧不稳定性的主要因素。瑞利准则^[6]认为如果与某一机理有关的燃烧速率以足够大的振幅进行振荡,而且这一振荡与燃烧室压力振荡的相位差足够小,则该机理可能激发不稳定性,但从瑞利准则中无法得知激励机理的具体物理机制,或者说无法知晓到底是哪一个过程在激发高频燃烧不稳定性。

在上述能量转换过程中,普遍认为蒸发过程进行得比较缓慢,而且其特征时间与声学振荡周期相当,因而是整个能量转换过程的控制过程。相应地,研究者通常用蒸发过程来解释燃烧不稳定性现象和存在的问题。广泛应用的 $n-\tau$ 唯相模型^[7]即以蒸发控制燃烧过程为基础,假设了一个特定的频率关系,并引入燃烧响应过程的特征时间——时滞,表示形式为

$$Q' = \bar{Q}n(1 - e^{i\omega\tau})p'/\bar{p}$$

式中, Q' 和 $\bar{Q}$ 分别为燃烧室脉动放热速度和平均放热速度; p' 和 $\bar{p}$ 分别为燃烧室脉动压力和平均压力; n 为相互作用指数,是一个增益系数; τ 为燃烧时滞,主要反应相位关系; ω 为角频率。 n 和 τ 在整个燃烧过程中都假设为常数(与频率无关)。

唯相模型在燃烧不稳定性分析中起到了一定的作用,但在描述实际燃烧响应过程中没能考虑特定条件下化学反应的控制作用。在能量转换的诸过程中,化学反应进行的时间最快,一般比蒸发时间小一个量级,通常被认为是燃烧不稳定性过程中的次要诱因。但当满足一定的喷雾、蒸发、传热、传质条件时,喷注器出口附近可能会形成一个预混区域,这个区域温度相对较低,化学反应速率也较慢。当与活化能有关的参数足够大时,化学反应速率对当地温度的扰动十分敏感,偶然的较小温升就会引起反应区更多的放热,进而又使当地温度和压力迅速升高。这种局部扰动以声波的形式向其他地方传播,最终就会产生燃烧不稳定性。从而,化学反应也有可能成为燃烧的控制过程^[8]。

高频燃烧不稳定性的振型与燃烧室固有声振型非常相似,而且几乎所有的高频燃烧不稳定性案例中所观测到的燃烧室压力振荡频率均与燃烧室基本形状的正则声振型之一的频率相差在百分之几内。因此,高频燃烧不稳定性研究的另一个主要内容就是燃烧室及喷嘴的

声学特性。研究表明,在燃烧室中最基本的非线性过程是二阶气体动力学,这种机理引起不同振型之间的耦合,耦合使振型之间产生能量传递,从而产生极限循环振荡^[9]。例如,气/液同轴式喷嘴就会影响发动机燃烧室声学特性,具体而言,内喷嘴的缩进比对气/液喷嘴工作时发生啸叫的参数范围、啸叫的频率和声压级有影响。而啸叫区间与喷嘴的结构尺寸有密切的关系,较大的喷嘴缩进比对啸叫有明显的抑制作用。啸叫的主要成分是高频噪声,这种喷嘴啸叫有可能成为诱发发动机高频不稳定燃烧的主要因素^[10]。又如,隔板抑制高频燃烧不稳定性的主要机理在于改变了燃烧室的声学特性及声场分布^[11]。目前,尚无关于燃烧过程和这些过程对线性及非线性振荡响应的切合实际的模型。线性稳定性研究有待完善,需要对隔板耗散、燃烧以及声学吸收器对隔板产生的基本波形的相互影响进行深入研究^[12]。近年来,随着燃烧理论和控制理论的发展以及传感器、控制器、数据采集元件和系统的不断完善,研究人员对燃烧不稳定性的主动控制理论、途径和技术等问题进行了积极研究^[13-18]。控制的目的在于让燃烧放热取得极大值的同时使燃烧室压力振荡为极小值,途径是优化两者之间的罚函数^[16]。

高频燃烧不稳定性研究的另一个主要内容是燃烧室声学特性、影响因素以及与燃烧过程的相互关系。与前述的燃烧室能量释放过程及其影响研究相比,燃烧室声学特性和相应的抑制高频燃烧不稳定性措施的研究进展似乎更大一些,得到的结论也更明确,包括隔板、声腔在内的许多工程措施确实有效地抑制了很多液体火箭发动机的不稳定燃烧,但相关的理论问题并没有很好地解决。同时,也缺乏确定声腔和隔板位置、结构形式和尺寸等的设计准则。此外,高频燃烧不稳定性和选用的推进剂与喷注器、发动机循环方式和燃烧室设计等有密切的关系,也与发动机的工作环境、生产工艺等诸多因素相关。

高频燃烧不稳定性研究涉及上述诸多方面,相关的理论研究也取得了很大的进展。也正因为问题如此复杂,迄今尚没有一个能反映高频燃烧不稳定性现象与上述诸多因素相关性的系统性理论,甚至也没有一个良好的物理模型。研究得到的理论、模型甚至参数的影响趋势等成果还很难为具体的液体火箭发动机设计提供指导,甚至也难以用于参数选择或者分析影响趋势。燃烧不稳定性的理论研究依然任重而道远。

1.1.2 数值仿真

数值仿真技术主要是基于燃烧不稳定现象可能的机理,如喷射、雾化、蒸发、混合以及化学动力学等所建立的物理和数学模型,通过数值计算,一方面研究某项或某几项参数对燃烧不稳定性的影响,如压力脉动随着时间推进对燃烧室声学扰动的敏感性、压力脉动的频率与燃烧室内的声学频率耦合性问题;另一方面,研究某项或某几项措施,如声腔、隔板等对燃烧室内波动过程的影响。数值仿真计算在发现问题、研究参数的影响趋势,了解抑制不稳定燃烧措施的作用及改进方向方面有着经济、快速的优势,仿真结果可以为设计或分析提供一定的依据。数值仿真的准确度及精确性依赖于对物理现象深刻理解而建立的物理模型和求解方法。燃烧不稳定性问题是非常复杂的,对现象理解的不足,试验数据库的有限,雾化、液滴动力学和液滴燃烧

实用模型的缺乏,这些问题是目前数值仿真还难以得到比较精确的结果,研究进展受限的主要原因。随着雾化、混合、声学、湍流扩散、射流动力学和燃烧学研究的深入以及计算方法和技术的不断完善,数值仿真在燃烧不稳定性研究中将发挥越来越重要的作用,并成为研究问题的有效途径之一。

1.1.3 雾化和混合实验

雾化实验可以提供下述多种信息,进而开展多项研究:①获得推进剂在燃烧室内雾化的破碎长度、液滴尺寸及分布等参数,有助于了解燃烧初始区域,结合隔板尺寸及其分布等,可以从一个侧面分析燃烧不稳定性的形成机理和隔板抑制高频燃烧不稳定性机理;②了解燃烧室内撞击波的产生及传播过程,研究撞击波与燃烧室其他过程的相互作用等;③研究撞击波是否能诱发和维持燃烧不稳定性,如何诱发,又怎样维持燃烧不稳定性;④了解蒸发、混合和化学动力学在不同推进剂、不同循环方式发动机燃烧不稳定性中所起的作用以及喷注器自激振荡引起的流量和混合比的变化与燃烧不稳定性的关系等。混合实验可以获得氧化剂和燃料在燃烧室中的分布,进而解读燃烧室中温度场的分布状况和燃烧室横向热流传递等问题。至于气/液喷注器的雾化和混合实验则可帮助确定液体核心区长度和喷注器火焰可能的分布状况,进而预估燃烧时滞等关键参数。总之,喷注器的雾化特性研究已经持续了近百年,一方面,有关射流的喷射、破碎、雾化以及与燃烧不稳定性问题的关联虽不十分清晰,但在帮助我们了解燃烧不稳定性现象方面确实起到了重要作用;另一方面,绝大部分现有的实验是在大气环境或模拟个别参数环境下进行的,环境的差异导致获得的参数很难用于发动机的实际条件,这无疑从根本上制约了与燃烧不稳定性研究相关的雾化和混合等激励问题研究的进展和水平。

1.1.4 喷注器动力学实验

研究表明,喷注器不但起着推进剂供应、雾化和混合的作用,而且也是液体火箭发动机这一动态系统中的“敏感元件、放大器、振荡器和相移器”。事实上,喷注器输出参数的脉动和相位的变化可能对燃烧室的压力脉动产生响应,在一定条件下甚至也可产生振荡。于是,喷注器的动态特性对发动机稳定工作有着重要的影响。燃烧不稳定性问题的产生正是燃烧室燃烧过程与发动机系统或者某个组件动态过程固有特性耦合的结果。因此,预防或者消除燃烧不稳定性最直接有效的途径就是调节或者控制发动机的燃烧过程,破坏发动机燃烧过程与系统其他过程的耦合。目前,消除不稳定燃烧的基本措施主要有两种:一是根据耦合机理,设法削弱或消除燃烧过程与发动机系统其他过程的耦合关系,以减少或切断维持振荡所需的能量;二是增加阻尼以使振荡衰减。而防止中、低频燃烧不稳定常见的措施是提高喷注器压降,增加供应管路或喷嘴孔的长径比等。可见,控制燃烧过程的主要措施之一就是改变喷注器的动态特性。以撞击式喷注器为例,雾化过程本身就是强烈的脉动过程。当撞击夹角、射流速度或者喷射压降较小时,喷射的液流与环境气体存在比较规则的气液边界,射流和液滴的二次雾化过程主要

是射流和液滴与环境气体的相互作用;但当射流速度及撞击夹角大时,射流或者撞击产生的液膜与环境气体存在剧烈的扰动。此时,高速动态分析系统流场的研究展示,喷雾锥角在强烈波动,与此相似,液膜或液丝的破碎长度也是波动的。喷注器动力学实验的目的就在于,研究给定结构的喷注器对何种液路振荡会产生放大或阻尼作用,相位又如何变化,进而研究通过优化喷注器结构消除或者阻尼系统液路振荡的方法。

1.1.5 声学特性实验

推进剂在燃烧室中的燃烧过程是一个膨胀过程,其时,燃气的密度和静压减小,流速增大,燃烧区的压力也随之降低。如果燃烧区之前的推进剂流动不稳定、流场不均匀,则混合气的形成、燃烧区的混合比以及燃烧完全性都会出现周期性的振荡。而变混合比的混合气燃烧会导致燃气生成量的变化和压力的变化。当推进剂在喷注过程中产生流量脉动时,经过燃烧区这一传递环节,燃烧产物也会产生压力脉动,如果燃烧区前推进剂流场的扰动传输时间和燃烧室固有振型的周期相耦合,就有可能产生自激振荡。通常,喷注器和燃烧室的声学模拟实验是在大气环境下,用模拟实验系统和方法,开展下述一系列研究:①喷注器在特定模拟燃烧室条件下声学谐振的频率、振型及振荡衰减率;②喷注器的结构尺寸对燃烧室声学特性的影响;③燃气通道长度、节流圈等对喷注器声学特性的影响;④燃烧室和发生器的声学振型及其分布;⑤安装声腔和隔板后燃烧室声学振型的分布和变化规律;⑥隔板等抑制燃烧不稳定性措施的效果。这些研究结果可为燃烧室与喷注器的声学特性分析、优化设计和单喷注器燃烧室低压燃烧模拟实验提供依据。

1.1.6 低压燃烧模拟实验

根据第三相似定理,保证两个对象(现象、过程、系统等)相似的充分必要条件是保证实物与模型的几何相似,并确保单值性条件相似参数的比例关系及实物和模型的决定性准则相等。对于燃烧不稳定性,单值性条件为燃烧室区域的几何特性,物理过程的相关参数,初始和边界条件。低压燃烧模拟实验就是从模拟现象与真实现象本质相同角度考虑,依据一定的模拟实验准则,采用实际或者模拟实验件,借助一定的初始边界条件,进行模拟实验以获得实际条件下物理过程的一些本质特性。例如,喷注单元热模拟实验是在大气环境下,依据出现一阶切向频率耦合点来确定发生高频燃烧不稳定性的工况,再依据相似准则将实验结果换算到实际工况,确定出被试喷注单元的工作边界及稳定性裕度。通常,低压燃烧模拟实验还可以用于开展下述一系列研究:①喷注器火焰长度、火焰的初始段特性、噪声、燃烧速率;②喷注器几何尺寸、工况参数及隔板高度等对高频燃烧稳定性的影响;③喷注器燃气通道内的自激声学振荡效应;④燃料射流在氧化剂环境中因周期性撞击所引起的声学不稳定性机理;⑤研究喷注器边缘火焰稳定条件不一致所致的声学不稳定性机理;⑥供给系统诱发的燃烧室压力谐振;⑦噪声趋于稳定性边界时衰减率和振幅的变化关系等。

全尺寸燃烧室高频燃烧不稳定性低压模拟实验原理与喷注单元高频燃烧不稳定性低压热模拟原理相同,实验方法也基本相似。不同之处在于前者的实验件是真实燃烧室,研究对象是头部的排列方式以及头部与燃烧室的匹配设计。由于实际燃烧室已经保持了几何相似,相似准则选取及工作参数的确定相对喷注器实验要容易一些。全尺寸燃烧室模拟实验的作用在于评估不同混合方案头部的相对稳定性;确定抗脉动装置(如隔板)的实用效果,并优化选择抗脉动装置的参数;确定燃烧室启动阶段的工作特性;为工作过程的数值计算模型提供数据。

1.1.7 缩比高压燃烧模拟实验

顾名思义,缩比高压燃烧模拟实验使用的是缩比燃烧室,其直径或横向尺寸比全尺寸设计的小,但为了尽可能显现激发高频燃烧不稳定性的机理和相关环境,其工作条件(混合比和燃烧室压力)通常接近于实际条件。基于同样的原因,喷注器单元的尺寸、喷注器与壁面的距离、燃烧室长度和收缩比通常也与全尺寸设计值相匹配。模拟喉部热流的要求决定了收敛段壁面半径要比全尺寸的小,这可能使燃烧室型面与全尺寸有很大差别。为了在“缩比”和“实际”之间加以权衡并适应缩比实验的需要,需要慎重选择稳定性和性能建模技术。通过建模可确定合适的工作条件和试件结构的参数范围(包括非额定的),并评定缩比试件的性能和稳定性特性。稳定性裕度和性能设计之间要进行折中。至于稳定性建模,不要求用严格的函数形式描述不稳定性机理,但应能在不同的几何和工作条件下,预估喷射和燃烧过程之间的主要耦合频率和增益。

缩比高压燃烧模拟实验可以获得与实际燃烧室燃烧不稳定性有关的大量信息,从而有助于研究和稳定分析技术,减轻不稳定性燃烧带来的风险,降低发动机研制费用。在燃烧室缩比实验中,经常采用多喷注单元,而燃烧室则视具体情况而定。国内外先后研制了脉冲燃烧室、环形燃烧室、楔形燃烧室、横向激振燃烧室、方形燃烧室、二维燃烧室、变长度燃烧室和缩小尺寸的圆形燃烧室等多种燃烧稳定性实验用的缩比装置。

缩比实验的结果可为全尺寸结构设计提供参考和建立接近实际的稳定性和性能模型。事实上,在与全尺寸构件类似的工况下进行的缩比试验能够显示类似的燃烧物理学特征。例如,雾化速率、液滴尺寸分布、蒸发和混合在缩比和全尺寸燃烧室条件下存在一定的相似性。若全尺寸燃烧室或隔板腔的声学频率与缩比试件相匹配,全尺寸设计中燃烧和振荡之间的相互作用(包括各个过程的相对特征时间)就能用缩比试验来合适地模拟。经过大量的试验,可以获得从缩比燃烧室实验得到的燃烧稳定性数据进行全尺寸结构燃烧稳定性分析和评估的方法,进而为实际燃烧室高频燃烧不稳定性设计提供依据。

总之,模拟实验具有研究机理和指导工程设计两方面的作用,且廉价、安全,但模拟实验研究还很不成熟。由于高频燃烧不稳定性问题涉及的学科领域多,物理现象十分复杂,因此要进行燃烧不稳定性的模拟,首先要明确是哪种机理在起决定作用。否则,激励机理尚不明确,很难进行模拟。同时,模拟实验也无法模拟全部的物理过程,模拟实验的结果验证也存在很大的

困难。此外,不同研究单位和研究人员对模拟实验的原理、途径、实验方法及其实用性也存在不同的观点,甚至有很大争议。但不可否认的是,模拟实验毕竟是很有前途的研究高频燃烧不稳定性的有效途径,必将得到研究者的重视和发展。

1.1.8 实际发动机燃烧不稳定性实验

实际发动机燃烧不稳定性实验是通过实际发动机的热试车实验,研究燃烧室的高频燃烧不稳定性;确定燃烧室燃烧稳定性裕度;考核燃烧不稳定抑制措施的实际效果。为确保安全,进行不稳定性实验时,并不直接测量燃烧室或者燃气发生器内的压力脉动,一般是测量喷注器供应管路或集液腔内推进剂的脉动压力、燃烧室或者发生器壳体的机械振动,用测量的频谱结果研究高频燃烧不稳定性的方法有多种。为研究燃烧室的稳定性裕度,通常是在燃烧室中利用激波管、脉冲枪等扰动装置产生人为扰动,测量燃烧室中扰动的衰减频谱,根据扰动衰减情况,研究实际燃烧室对偶然或自身产生的高频燃烧不稳定性的响应特性,使设计者对燃烧室抗高频燃烧不稳定性的能力有直观的认识,进而评估燃烧室的稳定性裕度。稳定性指标可以表示成多种形式(衰减率与流量关系、衰减率与混合比关系等),常用的评估指标是功率谱密度衰减率、燃烧室噪声振幅及脉冲的衰减率,这些指标的确定需要依据大量的实验结果。稳定性评估通常是发动机不同设计方案间的相对比较,不同参数发动机之间的相对评估,同一发动机不同生产批次间的对比等。

1.2 燃烧不稳定性的研究流程

燃烧不稳定性的影响因素众多,其中喷注器特性始终是研究的重点之一。研究内容涉及喷注器的射流流动特性、雾化特性、混合及分布特性,喷雾燃烧过程和喷注器的动力学特性等。在此基础上,改变喷注器的几何构型和工作参数,改进喷注器在燃烧室头部的排列方式是发动机抑制或消除高频燃烧不稳定性的主要措施之一。F—1 发动机^[19]、RD—0110 发动机^[20]、YF—20 发动机^[21]等发动机燃烧不稳定性研究中,喷注器特性的研究均占了大量的份额,而液氧/液氢发动机的燃烧不稳定性研究主要也是喷注器结构形式、工作参数及相关的抑制措施研究。

鉴于此,开展整个稳定性研究工作的基础是喷注器及其有关的稳定性装置(隔板和声腔),而模拟实验又是研究工作的重要手段和主要环节。模拟实验应最大限度地保持实际燃烧室中与燃烧过程相似的主要特性。但实际上,模拟实验往往是稳定性、性能和热流特性之间折中的结果,并取决于所选定的模拟实验,这些折中可能导致模拟实验的喷注器形式、燃烧室圆柱段长度、喷管入口几何形状和壁面液膜冷却量有所变化。还有,模拟实验应尽可能采用模块化的燃烧室组件,以拓宽喷注器和燃烧室的参数范围,但这样可能导致隔板和声腔在几何上与全尺寸结构不相似。例如,模块化缩比燃烧室可能采用带径向声腔的可拆卸圆筒,而全尺寸燃烧室

采用的可能是与喷注器本体结合在一起的轴向声腔。如果可能的话,要求模拟燃烧室尺寸所对应的频率与全尺寸隔板腔和/或燃烧室的频率相匹配。若在缩比试验中出现了燃烧不稳定,则在转入全尺寸喷注器研制前须做进一步的稳定性改进工作,因采用这种不稳定模拟燃烧室喷注器形式的全尺寸燃烧室很可能出现不稳定。此外,全尺寸燃烧室高频横向振型可能与模拟试件的频率范围匹配。

显然,在发动机研制的不同阶段,不稳定性研究的目的与要求也不同。研制初期,对以前抑制不稳定性措施的认知和运用可以提高燃烧室及燃气发生器的稳定性裕度。研制过程中,通过数值仿真及模拟实验可以比较结构的相对优劣,预选稳定性好的结构,研究喷注器、发生器或发动机的稳定工作边界。研制后期,通过施加人为扰动,在燃烧室激励出不稳定燃烧,通过振荡衰减幅度、喷前脉动压力和振动参数的综合评估,可以确定研制发动机的性能和工作范围。也正是发动机在不同研制阶段的不同需求,导致了在燃烧室设置阻燃肋条^[20],系统中增加节流圈^[21]等抑制不稳定性措施的产生。

伴随着发动机的研制过程,高频燃烧不稳定性研究大致分为4个阶段:①燃烧室和燃气发生器设计阶段,首先要深入分析以前抑制高频燃烧不稳定性的措施,如液相分区、声腔和隔板等使用的环境和实际效果,结合实际的燃烧室和发生器工作条件,充分借鉴和合理利用这些措施,设计出有较好稳定性的燃烧室或者燃气发生器方案;②尽可能应用前述的各种模拟方法,选择较优参数,提高燃烧室、发生器、喷注器等方案的稳定性裕量;③进行发动机热试车,考核燃烧室稳定性状况;④采用施加人为扰动的方法,在燃烧室中激励起高频不稳定燃烧,用振荡衰减幅度(振荡衰减率)评估发动机的稳定性,或者用喷前脉动压力、振动参数打分的方法进行综合评估,进一步了解研制发动机的性能,确定发动机的稳定工作范围。

在研制新发动机时,与发动机工程研制相结合,燃烧不稳定性研究一般应采取如下的研究步骤:

(1)喷注器雾化和混合实验。确定雾化的喷雾角、液滴尺寸速度、氧化剂与燃料的混合比及沿喷雾场横截面的分布。

(2)喷注器的动力学特性实验。通过实验,确定喷注器对特定激励频率的响应特性,研究喷注器对此频率的抑制或者放大范围以及相位特性。

(3)燃烧室和喷注器的声学实验。研究特定燃烧室的声学特征参数,预估实际燃烧室的声学特性;研究喷注器尺寸与燃烧室声学特征参数的相关性,在给定燃烧室结构的条件下,确定较优的喷注器结构和尺寸。

(4)喷注器低压燃烧模拟实验。研究喷注器结构尺寸对给定燃烧室高频燃烧不稳定性的影响,确定其较优的结构和尺寸。

(5)全尺寸头部燃烧室低压燃烧模拟实验。在低压燃烧实验验证的基础上,研究燃烧室头部喷注器排列方式对燃烧室高频燃烧不稳定性的影响。

(6)燃烧室和燃气发生器各自的热试车。确定发动机的高频燃烧不稳定性特性,验证高频

燃烧不稳定性抑制措施的实际效果。

(7)燃烧室不稳定性鉴定性实验。用人为扰动激励燃烧室的不稳定性,检验发动机抗击高频燃烧不稳定性的实际能力,评估燃烧室稳定性裕度。

如果不是新研制的发动机,则上述的某个或者一些步骤可以省略。

总之,燃烧不稳定性研究与发动机的研制是相互依存、相互促进的。发动机研制为燃烧不稳定性的研究提供了客观需求,也是燃烧不稳定性研究不懈的驱动力,而燃烧不稳定性研究的成果又极大地提高了发动机的研制水平。