

燃气发生器应用综述

赵芳¹, 任泽斌^{1,2}

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2. 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 燃气发生器是适用于航空航天、舰船、石油及汽车工业等领域的燃气生成装置, 具有应用范围广、种类多等特点, 受到了各行各业的关注。通过对国内外的大量文献进行分类总结, 分析了燃气发生器的应用研究领域。根据其工作原理进行了分类, 系统阐述了各类燃气发生器的工作特点及研究进展, 对各类燃气发生器在应用过程中存在的技术难点和发展前景进行了简要分析。认为研制高效、稳定、可靠的燃气发生器是各行各业发展的重点, 相关研究结果可为燃气发生器的选型及研制提供参考。

关键词: 燃气发生器; 航空航天; 舰船; 石油工业; 汽车工业

中图分类号: V231.2; TK479 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)03-0001-08

Overview of application of combustion-gas generator

ZHAO Fang¹, REN Zebin^{1,2}

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Facility Design and Instrumentation Institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: Gas generator is applied to aerospace, ships and warships, petroleum industry, automobile industry and other fields as a device for producing combustion-gas. It arouses general concern of every industry or trade for its widespread use and various types. In this paper, literature was classified and summarized from a lot of published references at home and abroad and applications of gas generator were viewed briefly. The gas-generators were classified on the basis of its working principle. Furthermore, working characteristics and research progress of various gas generators were described systematically. The technical difficulties encountered in the process of application and development prospect of gas generator were also analyzed. It is concluded that the development of efficient, stable and reliable gas generator is a key point of development in various fields. The research results provide references for the selection and development of gas generator.

Keywords: gas generator; aerospace; ships and warships; petroleum industry; automobile industry

0 引言

长期以来, 人类根据各个领域的需求致力于燃

气生成装置的研究, 其中应用最广的当属燃气发生器^[1]。燃气发生器是通过燃烧一定比例的燃料及氧化剂, 获得相应温度、压力、流量及速度等参数的

收稿日期: 2018-03-25; 修回日期: 2018-09-06

基金项目: 国家 863 计划项目(2014AA8061009)

作者简介: 赵芳(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为燃气发生器设计、试验及流体力学

混合燃气,以实现特定目的的燃气生成装置^[2-3]。

燃气发生器首先应用于航空航天领域,随后迅速向舰船、石油及汽车等行业发展。如超燃及亚燃冲压发动机地面试车^[4-15]、驱动涡轮^[16-18]、提供引射工质^[19-25]、船用燃气轮机^[16-18,26]、石油输送管道增压、汽车安全气囊充气^[27-34]以及其他相关应用等^[35-43]。

考虑到燃气发生器的多用途性及多种类性,特定需求的燃气发生器选型及研制需要借鉴国内外已有的成功经验。

1 应用领域

1.1 航空航天领域

自莱特兄弟实现首次飞行以来,飞行速度一直是人类追求的目标,从亚声速到超声速,再到高超声速,每次速度的跨越背后是发动机技术的巨大提升:从活塞式、涡喷发动机、涡轮风扇到亚燃冲压发动机,直至超燃冲压发动机^[13]。目前,地面试验(试验组成如图1所示^[15])是研究超燃冲压发动机的一项重要技术途径,主要由加热器系统和引射式真空系统组成,其中燃气发生器(也称燃烧型空气加热器)是这两大系统不可或缺的关键子系统^[14]。

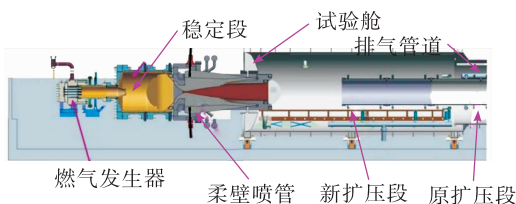


图1 超燃冲压发动机地面试车装置组成

Fig.1 Ground experimental system of scramjet engine

超燃冲压发动机地面试验常用的加热器类型包括:热管交换式加热器、卵石床蓄热式加热器、电弧加热器、激波管式加热器及燃气发生器等,其中热管交换式加热器可提供最高总温为1 000 K的纯净气流,但考虑到热交换问题,该方式提供的气流总温有所限制;卵石床蓄热式加热器加热的气流总温可达2 200 K,但该加热器存在启动时间长、产生固体颗粒等问题;电弧加热器提供的气流总温可达3 000 K,可控性好,运行时间较长,但其需要配备大功率的电弧设备,实验费用昂贵,而且电弧加热会

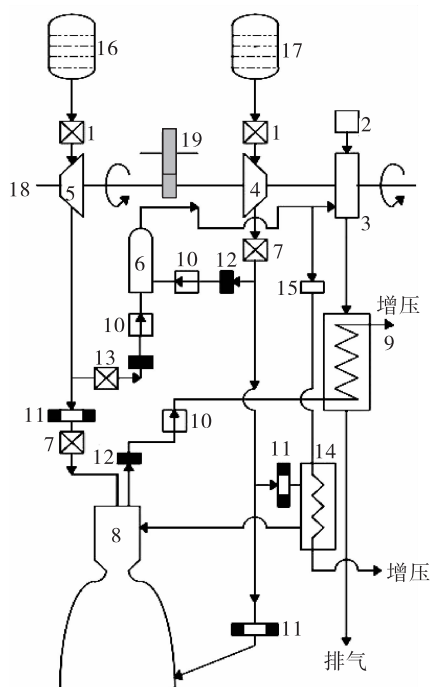
导致空气离解,引入杂质;激波管加热器加热的气流总温可达6 000 K以上,无污染,但其工作时间很短,一般只应用于高马赫数($Ma > 8$)的地面试验,适用性窄;而燃气发生器具备温度范围较宽、实验成本较低、实验周期短、结构紧凑以及快速启动等优点,尽管加热气流中存在一定的污染成分,例如通过燃烧氢加热空气会产生水分污染,而燃烧碳氢燃料则产生水和二氧化碳污染,但通过查阅国内外文献来看,其中的污染成分存在的影响均在可接受的范围之内^[9-12],由此燃气发生器是超燃冲压发动机地面试验应用最为常用的加热器类型。与其他应用需求不同的在于:应用于超燃冲压发动机地面试验加热系统时,燃气发生器的职能是模拟实际飞行时的总焓、总温及组分组成等相关来流条件,因此,燃气形成后必须补充一定的氧气以保证燃气中氧含量与空气中相同。

最初的超燃冲压发动机地面试验真空系统主要采用真空罐系统和引射系统两种^[13]。考虑到真空罐系统结构较为笨重,准备过程耗时长而持续工作时间短,无法满足超燃冲压发动机长时间试验的需要,而燃气引射由于结构简单、引射能力强、响应快等优点被广泛采用,因此超燃冲压发动机地面试验真空系统目前主要采用燃气引射方式^[13]。其组成包括燃气发生器、引射器及扩压器3个子系统,其中燃气发生器旨在为引射系统提供高温工质,相对于传统的压缩空气、氮气引射工质而言,高温燃气引射的优势在于其引射效率高,而且装置规模较小。

在液体推进剂发动机系统中,需要用气体为推进剂供应系统和其他分系统提供动力源。随着液体火箭发动机技术的发展,常规的瓶装压缩气体(例如氦气)已经满足不了这一动力需求,取而代之的是采用燃气发生器装置产生的高温燃气,采用该方法可以获取更高的系统性能。此外,为了使整个系统简化,燃气发生器尽可能利用液体推进剂发动机系统自带的主推进剂产生燃气,然而,在某些应用中,例如在挤压式供应系统中或者泵压式供应系统的启动,用于产生燃气所需的高压推进剂并不是从主系统中获取。

常规的泵压式液体火箭发动机系统组成如图2所示。对于整个泵压式液体火箭发动机系统而言,燃气发生器的设计要求结构紧凑、平滑启动及关

机、工作范围广、不需要复杂的吹除及卸出系统以及具备安全重复启动的能力^[44-45]。



1—启动活门;2—火药启动器;3—涡轮;4—燃料泵;5—氧化剂泵;
6—燃气发生器;7—主活门;8—推力室;9—蒸发器;10—单向活门;
11—节流圈;12—文氏管;13—断流活门;14—降温器;15—音速喷管;
16—氧化剂贮箱;17—燃料贮箱;18—涡轮泵转轴;19—齿轮箱。

图2 泵压式液体火箭发动机系统组成

Fig. 2 System compositions of turbo-pump liquid rocket engine

在航空航天领域,燃气发生器的应用还包括宇航员救生服、民用航空紧急救生的充气滑梯、空降兵、软着陆气垫、无人机发射及回收等^[35]。

1.2 舰船领域

相比于其他动力装置,燃气轮机具有结构简单、启动快、功率大、体积小及机动性强等优势,广泛应用于军用舰艇及民用船舶的动力系统,承担着非常重要的职能。常规的燃气轮机结构组成主要包括压气机、燃烧室及涡轮,原理如图3所示^[17],其中燃烧室即为一种燃气发生器,其主要作用在于产生高温燃气、驱动燃气轮机涡轮,由此带动压气机与外载荷转子同步高速旋转,从而完成液体或气体燃料的部分化学能至机械能的转换,同时输出电能。时至今日,船用燃气轮机的应用范围日趋广泛,大到轻型航空母舰、巡洋舰,小到快艇、气垫船。

从水面战斗舰艇到军用辅助船,进而到民用船舶,船用燃气轮机都成为令人青睐的动力,也是其他类型动力不可比拟的。广泛的应用必然会带来经济、节能、环保等一系列问题,使人们不得不开展研究,以提升燃气轮机的设计技术(包括无污染推进剂研究),提高燃气轮机的热效率、可靠性及寿命等性能参数,从而更好地满足水面舰艇及船舶主动力装置现代化的需求。

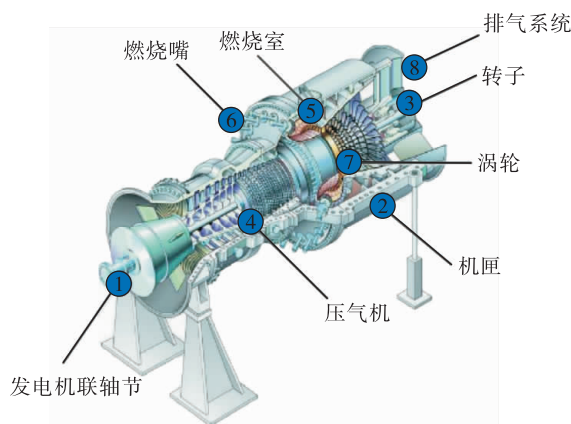


图3 西门子某燃气轮机系统组成

Fig. 3 A type of Siemens gas turbine

冷发射导弹武器系统的应用由最初的鱼雷发射推广至导弹的潜艇水下发射及井下发射等,其关键组成部分为发射动力系统,常规的动力系统组成如图4所示,功能在于提供导弹在发射筒类内运动的作用力,为导弹的可靠点火和目标定向提供必要的初始内弹道。而整个发射动力系统的动力源为燃气发生器,主要分为整体式和装配式两种,前者的优点在于气密性好,可以防止接头处发生漏气现象,此外,整体式质量小,有利于减轻系统的整体质量。这一点对于战术导弹而言意义重大,然而,对于中远程的战略导弹来说,整体式燃气发生器会增加加工工艺的难度,因此,通常来说,战略导弹弹射系统主要采用装配式燃气发生器。应用于发射动力系统的燃气发生器工作原理类似于固体火箭发动机,燃气发生器中的火药在极短的时间内通过燃烧的方式转变为热能,通过喷管排入到密闭容器内,建立一定的压力、形成可将导弹推出发射筒的弹射力,其工作性能直接关系到动力系统内弹道指标的实现^[36]。

除上述提及的应用之外,燃气发生器在舰船领域的应用还涉及到救生筏、沉船打捞以及舰载无人机等^[35]。

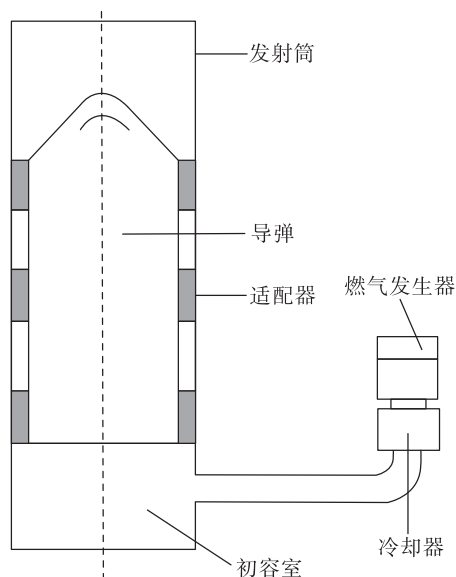


图4 冷发射导弹动力系统组成

Fig. 4 Cold launching power system of missile

1.3 石油及汽车行业

作为发动机的燃气轮机,其应用不仅仅局限于上述提及的航空航天和舰船领域,在石油行业应用同样广泛,而且职能不单一,如在海上采油各种功能的平台上不仅可以带动发电机组,还可以用于驱动压缩机,效益同样良好。海上采油气平台采用燃气轮机有其特有的优势:满足电力系统的独立性、效率高及启动快等特点;“就地取材”,可利用海上开采平台获取的天然气作为燃料,由此有效防止了因开采平台距离陆地较远,带来的如燃料运输不便、危险及高额运输费等问题。此外,解决了因开采平台空间狭小,引发的燃料难以大量储存的问题^[18,39]。应用于海上采油气的常规燃气轮机发电机组及供风示意图如图5所示^[39],其中,作为关键部件之一的燃烧室,即为一种燃气发生器。在能源紧缺的今天,不同于飞机发动机所采用的高级航空汽油、其他发动机上采用的汽油或经处理的轻质燃油等带来的价格昂贵、燃料运输与储存要求高等问题,燃气轮机凭借其“就地取材”的燃油优势,在海洋采油设施上得到了更为广泛的应用。

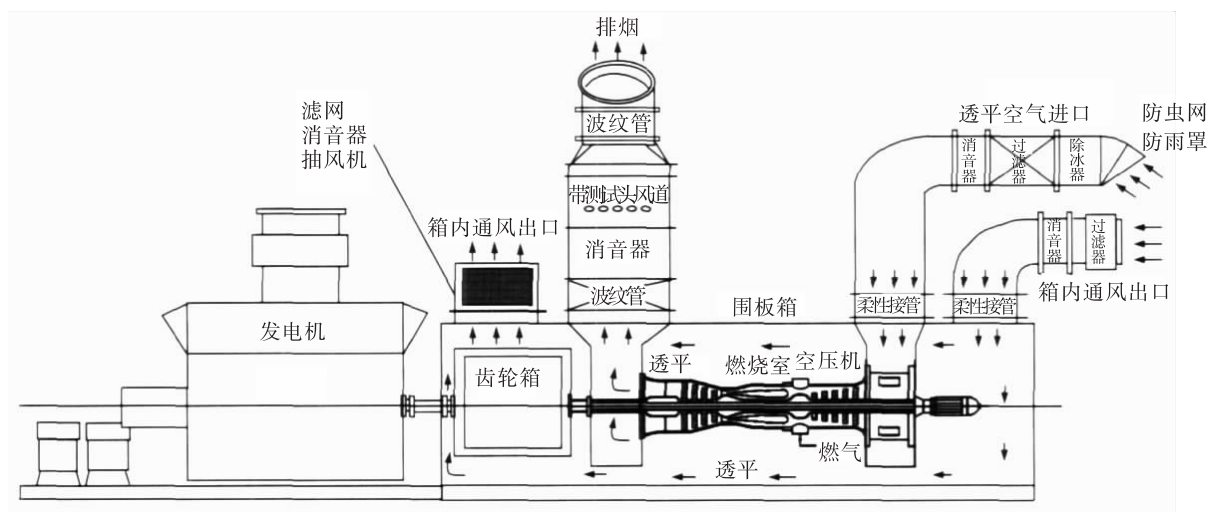


图5 常规燃气轮机发电机组及供风系统示意图

Fig. 5 Generator set and air supplying system of conventional gas turbine

在汽车工业发展中,为了保证人们的生命财产安全,需要不断地提升汽车的安全性能。而安全气囊则是汽车安全系统的关键核心,影响安全气囊性能的决定性组件则是燃气发生器,其工作流程为:一旦汽车产生碰撞,点火系统则接收到由控制系统发生的指令,快速点燃燃料,燃烧得到的气体经过

过滤装置处理后进入气袋,气袋快速膨胀,从而将乘客隔离开,保证了乘车人的安全。

燃气发生器的性能直接关乎安全气囊打开的质量^[27-28],由此关于汽车安全气囊的燃气发生器研究同样热门^[29-30],常用的安全气囊燃气发生器如图6所示,主要组成部件包括金属外壳、气体燃料、

点火设备,以及过滤设备。目前来说,大部分汽车安全气囊燃气发生器所采用的燃料(例如氮化钠)在生产及后处理过程中对环境及人身都会带来潜在的危险。由此,汽车开发商开始研发其他可替换的环保燃料,比如通过燃烧氢气与空气,以及采用惰性气体等。此外,燃气发生器的响应及产气时间也是一项关键的指标,缩短燃气发生器响应、产气直至充满安全气囊的时间,将大大提升安全气囊的安全性能。

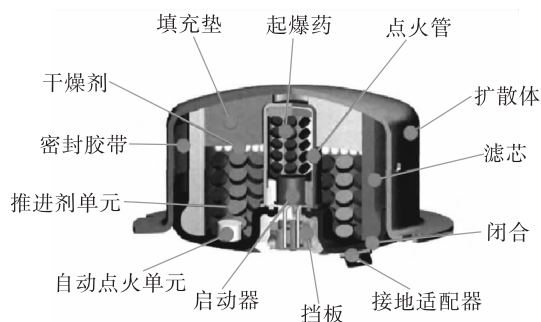


图6 汽车安全气囊燃气发生器结构示意图

Fig. 6 Gas generator of automobile airbag

近年来,随着汽车领域的飞速发展及道路条件的改善,汽车行驶的速度越来越快,汽车被动安全技术研究成为一项热门课题,如汽车安全带预紧器研究,该装置一般由燃气发生器、活塞、转动轮和安全带等组成。其工作原理为:当汽车发生碰撞时,电点火信号激发燃气发生器的电点火头,点燃燃气发生器中的燃料,燃烧迅速产生大量的气体,使活塞内的压力急剧增加。高压气体使活塞运动并带动驱动轮旋转。旋转的驱动轮使卷带筒发生器转动,而此时安全带被顺势卷入卷筒上,达到安全带被回拉的目的,从而限制或减缓乘员因惯性发生的前冲,可对乘员进行有效的保护。该项技术仍处在研究与发展阶段^[34],与前文提及的汽车安全气囊燃气发生器类似,该项技术涉及燃气发生器的主要研究方向包括:环保的燃料、快速燃烧技术及高产气量等。

此外,燃气发生器在汽车的紧急刹车制动装置中同样有所应用。

1.4 其他

随着科学技术的发展,燃气发生器不仅仅应用

于航天航空、舰船领域及石油与汽车工业,根据其工作原理及特有的优势,激光器压力恢复系统、救生筏、应急灭火、军用伪装充气假目标等研究中均有效采用了燃气发生器^[19-20,35]。

2 燃气发生器工作原理及分类

为满足各个领域不同的需求,燃气发生器产生燃气的途径多样化,按照工作原理的不同可分为三类:基于液体火箭发动机技术的燃气发生器(简称基于液发技术的燃气发生器)、基于航空发动机技术的燃气发生器(简称基于航发技术的燃气发生器)、基于固体火箭发动机技术与基于烟火技术的燃气发生器(简称其他类型燃气发生器)^[1]。

2.1 基于液发技术的燃气发生器

基于液体火箭发动机技术的燃气发生器发展较早,应用较为广泛。结构大同小异,典型的基于液发燃气发生器结构如图7所示,主要由喷注盘、燃烧室、喷管、点火系统及辅助系统等组成,在很多应用中,为了实现长时间工作,需要配套水冷系统。

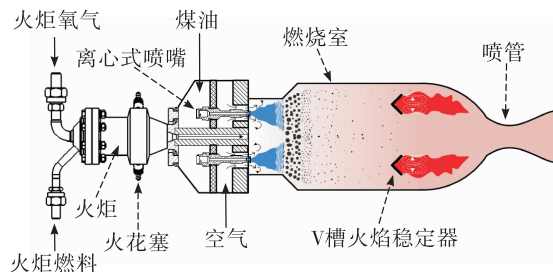


图7 基于液发燃气发生器结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of gas generator based on liquid rocket engine

迄今为止,国内外学者通过理论分析^[46]、数值计算^[47-50]及试验^[51-55]等手段,开展了基于液发技术发生器的相关研究,主要集中在燃气发生器的点火、出口均匀性及结构优化等方面^[55-57]。

钟战^[2]对基于液发技术的燃气发生器的研究现状进行了详细阐述,并以低浓度酒精及氧气/空气为推进剂开展了试验研究,分析了影响燃气发生器点火与燃烧效率的因素,得到了提高其点火与燃烧效率的方法与措施。冯军红^[7]、赵芳^[8]结合数值仿真与试验研究了喷嘴结构参数对空气/酒精/氧气三组元燃气发生器喷注面板热防护及燃烧性能

的影响,并提供引用筛锥提高燃气发生器出口燃气的均匀性。

目前,基于酒精/空气及酒精/氧气的燃气发生器技术较为成熟,但为了工程需要,很多学者也采用了其他组合推进剂,如空气/煤油、低浓度过氧化氢/酒精分解补燃、液氧/甲烷、一氧化二氮/乙醇等^[2,23-25]。

2.2 基于航发技术的燃气发生器

基于航发技术的燃气发生器是在涡轮喷气式航空发动机和涡轮风扇式航空发动机燃烧室技术上改造而来。根据用途的不同,改造的方式方法也有区别,比如为了满足燃气轮机(舰船、电力发电、石油开采等)的使用要求,通过取消加力燃烧室、满足长寿命及采用天然气作燃料等要求进行改进设计^[26]。

改造后用于提供引射工质的基于航发技术的燃气发生器如图8和图9所示,主要由燃烧室机匣(含前后连接法兰)、旋流器、火焰筒、喷嘴、点火装置等组成,整体水平横式布置^[21-22]。

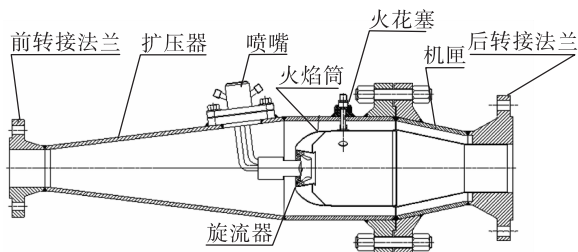


图8 单管燃气发生器结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of gas generator based on single tube combustor of aero-engine

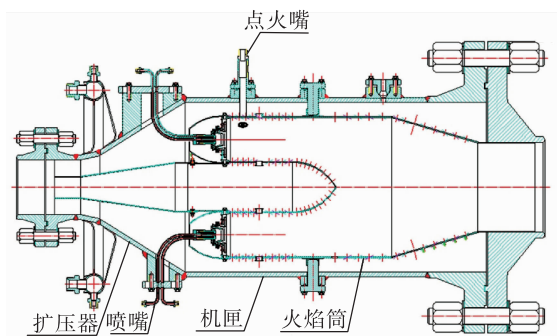


图9 环形燃气发生器结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of gas generator based on annular combustor of aero-engine

相比于基于液发技术燃气发生器而言,以上两种燃气发生器均采用气膜冷却,可实现长时间工作运行,并缩小了辅助系统规模。与基于液发燃气发生器类似,基于航发技术的燃气发生器采用的推进剂同样种类繁多,包括空气/酒精、空气/航空煤油等。

2.3 其他类型燃气发生器

除了上述提及的两类常用的燃气发生器以外,基于固体火箭发动机技术及烟火技术的燃气发生器也是应用相当广泛的一类。此类燃气发生器的氧化剂与燃烧剂均为固态形式,经过均匀混合之后以装药的形式直接贮存在燃烧室内,通过点火装置点燃后产生高温燃气。典型的基于烟火技术的燃气发生器(主要指汽车安全气囊气体发生器)如图6所示,主要由发生器体、引药、火药、点爆装置及线束连接器等组成,工作时通过线束进入点爆装置,产生火花引爆引药,火药瞬时产生大量气体。

基于固体火箭发动机技术的燃气发生器结构如图10所示,其组成部分主要包括壳体、固体推进剂、喷管组件及点火装置等。该类发生器采用固态物质作为推进剂,固体推进剂点燃后在燃烧室中燃烧,产生高温高压燃气,实现化学能转化为热能^[43]。

此类燃气发生器的特点在于可长期贮存,但存在工作时间短、重复启动困难等缺点,仅适合一次性工作。

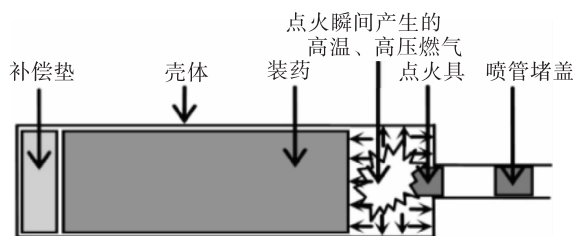


图10 基于固发技术燃气发生器结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of gas generator based on solid rocket engine

3 结束语

燃气发生器凭借其种类繁多、响应快、适用性广等特点,普遍应用于各行各业,特别适合于航空航天、航海等恶劣的使用环境,也成功推广至石油

及汽车等领域。未来,燃气发生器将会在军事、民用行业得到更加广泛的应用,对于燃气发生器的性能要求也将更为严苛。小型化、绿色推进剂、安全系数好及产气效率高等高性能燃气发生器势必成为各领域研究的重点。

参考文献:

- [1] 康忠涛,李清廉,张新桥. 基于V型槽的空气/煤油燃气发生器火焰稳定方法研究[J]. 推进技术,2013,34(9):1231-1239.
- [2] 钟战. 燃气发生器点火与燃烧性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- [3] 李刚,危懿,褚卫华. 燃气发生器空气压力控制策略研究与实现[C]//中国空气动力学会测控专业委员会第六届六次全国学术交流会论文集. 惠州:中国空气动力学会测控专业委员会,2015.
- [4] 张新宇,陈立红,顾洪斌,等. 超燃冲压模型发动机实验设备与实验技术[J]. 力学进展,2003,33(4):491-498.
- [5] SARISIN M N. Design of Connected Pipe Test Facility for Ramjet Applications [Z]. METU Mechanical Eng Dept Master Thesis,2005.
- [6] 刘友朋. 低总温空气加热器数值仿真与试验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
- [7] 冯军红. 高焓高压空气加热器数值仿真与试验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [8] 赵芳. 低总温直连式空气加热器数值仿真与试验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
- [9] 李卫强,宋文艳. 水组分对高超声速冲压发动机性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2006,7(5):10-12.
- [10] LE J L, LIU W X, SONG W Y, et al. Experimental and numerical investigation of air vitiation effects on scramjet test performance: AIAA-2009-7344 [R]. Bremen: AIAA, 2009.
- [11] VYAS M A, ENGBLIM W A, GEORGIADIS N J, et al. Numerical simulation of vitiation effects on a hydrogen-fueled dual-mode scramjet: AIAA-2010-1127 [R]. Orlando: AIAA, 2010.
- [12] 陈亮,宋文艳,李建平. 实验气体污染对超音速燃烧性能影响的数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(3):142-146.
- [13] 张新桥,李清廉,康忠涛. 空气/煤油/水燃气发生器点火特性试验[J]. 国防科技大学学报,2013,35(4):35-40.
- [14] 贺武生. 超燃冲压发动机研究综述[J]. 火箭推进,2005,31(1):29-32.
- [15] HE W S. Review of scramjet engine development [J]. Journal of Rocket Propulsion,2005,31(1):29-32.
- [16] VAUGHN, DUST Y, GARRA R D, et al. Transitioning to fly the mission: AIAA-2010-1714 [R]. Nashville: AIAA, 2010.
- [17] 金鹏. 舰船燃气轮机机匣处理数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [18] 翁一武,闻雪友,翁史烈. 燃气轮机技术及发展[J]. 自然杂志,2017,39(1):43-47.
- [19] 蒋红梅. 燃气轮机主要构件可靠性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [20] CONNAUGHTON J C. Application of a hydrazine gas generator to vacuum ejector pumping of a chemical laser: AIAA-1977-0892 [R]. Orlando: AIAA, 1977.
- [21] 徐万武. 高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.
- [22] 罗智锋. 一种以乙醇为燃料的环形燃烧室燃气发生器: 201310683250.5 [P]. 2014-04-02.
- [23] 罗智锋,冯大强,屈成泽,等. 一种以乙醇为燃料的单管燃烧室燃气发生器: CN204534569U [P]. 2015-08-05.
- [24] 李春红,张小平,马冬英,等. 液氧/甲烷燃气发生器点火方案研究[J]. 火箭推进,2010,36(5):7-12.
- [25] LI C H, ZHANG X P, MA D Y, et al. Ignition scheme of LOX/methane gas generator [J]. Journal of Rocket Propulsion,2010,36(5):7-12.
- [26] 刘盛田,胡兴伟,柳琪,等. 一氧化二氮/乙醇燃气发生器试验研究[J]. 舰船科学技术,2008,30(S2):223-226.
- [27] 金盛宇,许宏博,吉林. 空气/煤油燃气发生器技术研究[J]. 火箭推进,2014,40(3):29-32.
- [28] JIN S Y, XU H B, JI L. Technology research on air/jet fuel gas generator [J]. Journal of Rocket Propulsion,2014,40(3):29-32.
- [29] 严成忠. “昆仑”发动机的衍生发展[J]. 航空发动机,2009,35(1):11-17.
- [30] 钟志华,杨济匡. 汽车安全气囊技术及其应用[J]. 中国机械工程,2012,11(S1):234-237.
- [31] 姚俊,罗运强,牛振宇,等. 气体发生器低温点火稳定性研究[J]. 当代化工,2013,42(4):452-455.
- [32] NAKAYASU M I, NOMA N I. Gas generator for restraint-

- ning device for vehicle; US20070927503 [P]. 2009-09-22.
- [30] KOBAYASHI T, MATSUDA N. Gas generator for re-straining device of vehicle; WO2010JP50659 [P]. 2010-07-22.
- [31] 岳通通, 刘丹, 何步金. 一种安全气囊气体发生器: CN203391723U [P]. 2014-01-15.
- [32] 刘亮, 罗运强, 张文龙, 等. 安全气囊点火药点火性能的研究[J]. 当代化工, 2013, 42(10): 1398-1400.
- [33] 王卫国. 汽车安全带预紧器用气体发生器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [34] 余义. 预紧式安全带防护效率研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [35] 牛振宇, 王小强, 付文斌. 燃气发生器在无人机上的应用[J]. 飞航导弹, 2015(5): 89-92.
- [36] 都军民, 张宇. 发射动力系统主装药温度变化规律研究[J]. 火工品, 2008(3): 1-3.
- [37] 赵世平, 鲍福廷. 燃气蒸汽式发射系统内弹道若干问题研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 7-10.
- [38] 芮守祯, 邢玉明. 导弹发射动力系统发展研究[J]. 战术导弹技术, 2003(5): 4-9.
- [39] 孔令海. 海洋平台燃气透平电站的选型设计[J]. 中国海上油气(工程), 2001, 13(4): 48-51.
- [40] BOWN N, DARLEY M. Advanced airbag landing systems for planetary landers [C]//18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [41] 张丽梅, 郝芳. 火星气囊气体发生器充气过程稳压仿真研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(6): 30-38.
- [42] 邵志建. 次生气囊在无人机回收系统中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1): 93-96.
- [43] 卢福刚. 自由装填装药固体火箭发动机点火冲击研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(6): 83-86.
- [44] JEON K S, LEE J W, LEE C, et al. Optimal gas generator design for the liquid rocket engine; AIAA-2004-0032 [R]. Reno; AIAA, 2004.
- [45] 郑大生, 王菊金, 胡长喜. 液体发动机变推力的研究和实现[C]// 航天动力技术发展与应用学术会议论文集. 沈阳: 中国航天第三专业信息网第二十七届年会, 2006.
- [46] 刘朋, 张平, 周源泉. 某燃气发生器壳体的结构可靠性分析与评估[J]. 推进技术, 2001, 22(5): 411-414.
- [47] 闫璞, 王敏庆, 盛美萍. 燃烧腔不稳定燃烧的有限元数值分析[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(5): 21-23, 28.
- [48] FOURNET A, LONCHARD J M, THOMAS J L. Technological demonstration for low cost gas generator; AIAA-2004-4006 [R]. Fort Lauderdale; AIAA, 2004.
- [49] NGUYEN H. Flow/thermal analysis of X-34 orbital stage gas generator design; AIAA-1996-3226 [R]. Lake Buena Vista; AIAA, 1996.
- [50] 聂万胜, 庄逢辰. 喷雾特性对液体火箭发动机燃烧稳定性的影响[J]. 推进技术, 2000, 21(3): 56-59.
- [51] 苗森, 王文杰. 某燃气发生器地面台架试车性能分析[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 41-44.
- [52] KIM J, HONG S S, JEONG E H, et al. Development of a turbo pump for a 30 ton class engine; AIAA-2007-5516 [R]. Cincinnati; AIAA, 2007.
- [53] DENNIS H J, SANDERS T. NASA fastrac engine gas generator component test program and results; AIAA-2000-3401 [R]. Las Vegas; AIAA, 2000.
- [54] MAH C S. Evaluating the operational limits of a gas generator; AIAA-2001-3990 [R]. Salt Lake City; AIAA, 2001.
- [55] 肖锋. 过氧化氢自燃点火器的试验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [56] 陈建华, 李龙飞, 周立新, 等. 液氧/煤油补燃火箭发动机整流栅应用研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 1-6. CHEN J H, LI L F, ZHOU L X, et al. Application of the perforated distribution plate in the LOX/kerosene staged combustion rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(2): 1-6.
- [57] 童晓艳, 蔡国飙, 尘军, 等. 燃气发生器身部多学科设计优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1250-1254

(编辑: 马 杰)