

文章编号: 1003-1480(2024)02-0026-04

# 过滤结构对贮箱增压用燃气发生器输出性能的影响

陈静, 张博, 张明, 杨甲甲, 杨敏鹏

(陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 针对某液体姿控发动机贮箱增压用低燃温燃气发生器, 开展了内部过滤结构对其输出性能影响的试验研究。试验验证及结果分析表明: 燃气发生器内部压强曲线的升高是由贮箱与过滤结构的共同影响造成的; 即使贮箱反向压力不超过喷管临界压强, 但在反向压力作用下药剂燃烧产生的固体残渣更易堵塞过滤层成为二次喉道, 使燃气发生器内部工作压力依然持续升高; 在满足燃气洁净度及降温吸热的前提下, 采用低燃温复合推进剂的贮箱增压用燃气发生器的过滤层相对密度不宜超过 0.45。

**关键词:** 燃气发生器; 贮箱增压; 复合推进剂; 过滤结构

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.005

## Influence of Filter Structure on the Output Performance of Gas Generator for Tank Pressurization

CHEN Jing, ZHANG Bo, ZHANG Ming, YANG Jia-jia, YANG Min-peng

(State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** Aimed at some low combustion temperature gas generator used for some liquid attitude control engine tank pressurization, the influences of internal filter structure on output performance of gas generator were studied by tests. The test results show that the increase of gas generator inter pressure is caused by the combined influences of tank back pressure and filter structure. Even if the tank back pressure does not exceed the critical pressure of nozzle, the solid residue generated by composition combustion is more likely to block the filter layer and become the secondary throat under the condition of back pressure, which cause the working pressure inside the back of gas generator still continues to rise. Under the premise of gas cleanliness and cooling and heat absorption, the relative density of filter layer of the gas generator for tank pressurization using low combustion temperature solid propellant should not exceed 0.45.

**Key words:** Gas generator; Tank pressurization; Composite propellant; Filter structure

低燃温燃气发生器主要用于液体姿控发动机贮箱增压、涡轮泵起动、气囊充气等方面, 其通过燃气发生器内部装药燃烧, 经过过滤降温结构输出低燃温洁净气体, 提供增压或充气的气源<sup>[1-2]</sup>。由于液体发动机工作过程中, 燃气发生器一直与贮箱通过管道连接, 管道内通常设计有安全阀、气动阀等结构。为避免燃烧产物固体残渣堵塞阀门, 对输出燃气的洁净度提出了更高要求。因此, 燃气发生器内部常采用过滤结构,

在气囊或贮箱的反向压力下, 过滤结构会引起燃气发生器内部工作压力变化, 从而影响输出性能及可靠性。目前, 有关低燃温燃气发生器的研究主要在低燃温药剂及过滤降温结构方面<sup>[3-6]</sup>, 而对反向压力条件下的内弹道性能研究还未见报道。因此, 本文针对一种贮箱增压用低燃温燃气发生器过滤结构对其输出性能的影响进行研究, 明确过滤结构设计准则, 为过滤结构设计提供支撑。

收稿日期: 2023-10-25

作者简介: 陈静 (1990-), 女, 副研究员, 主要从事燃气做功类火工品技术研究。

通讯作者: 张博 (1993-), 男, 工程师, 主要从事燃气做功类火工品技术研究。

引用本文: 陈静, 张博, 张明, 等. 过滤结构对贮箱增压用燃气发生器输出性能的影响[J]. 火工品, 2024(2): 26-29.

## 1 设计

### 1.1 过滤结构设计思路

燃气发生器总体结构示意图见图1,设计基本参数见表1。

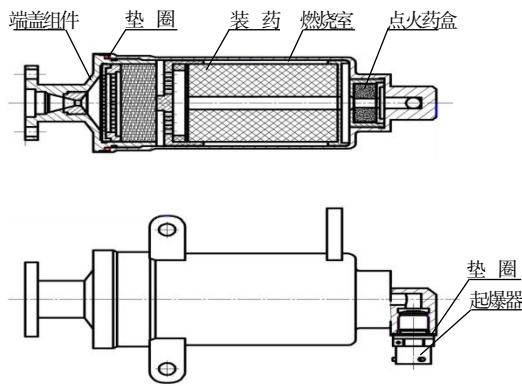


图1 燃气发生器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of gas generator

表1 燃气发生器设计参数

Tab.1 Design parameters of gas generator

| 装药               | 装药燃速<br>(mm·s <sup>-1</sup> )         | 工作<br>时间<br>/s | 平均工<br>作压强<br>/MPa | 装药<br>量<br>/g | 贮箱<br>气枕<br>/L | 贮箱增<br>压压强<br>/MPa |
|------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|
| 低燃温<br>复合推<br>进剂 | 4.4(10MPa)<br>(6~18MPa)<br>压力指数 0.25) | 2.0            | 12                 | 114           | 0.8~4.4        | 4.8                |

由图1可见,燃气发生器主要由起爆器、燃烧室、装药、端盖组件、点火药盒等组成。装药采用低燃温复合推进剂、单根管状药柱,端面一面包覆,减燃面燃烧。点火采用黑火药+镁/聚四氟乙烯高能点火药,混合压制成药环。

燃气发生器点火后,燃气经管路进入到贮箱内,在0.6s内将0.8L贮箱增压至4.8MPa,随后贮箱气枕逐渐增大至4.4L,持续充气至贮箱内压强5MPa,燃气发生器工作时间2.0s。增压过程尽可能保持贮箱内压强平稳,贮箱最大压强不超过5.8MPa。

为确保进入管道内的燃气洁净度,避免燃烧产物固体残渣堵塞阀门,在燃气发生器端盖内设计了3层过滤结构,如图2所示。图2中第1层为不锈钢丝压制滤层;第2层为过滤筛板,设计有多个小孔,能够进一步过滤较大残渣尤其是点火药产生的残渣;第3层过滤结构为2层钼网(200目+300目)叠加,进一步过滤较小固体残渣。3层过滤结构不仅能保证进入管道内的燃气洁净度,还能起到吸热降温作用。

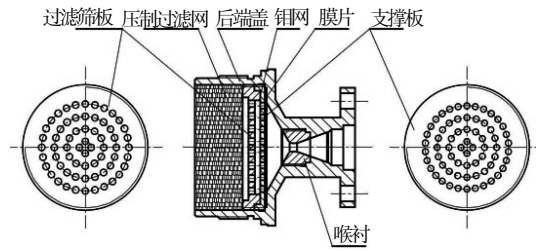


图2 过滤结构示意图

Fig.2 Filter structure diagram

### 1.2 理论分析

低燃温燃气发生器作为气源时,随着充气过程贮箱内的压强逐渐升高,燃气发生器出口存在一定反向压力。考虑到贮箱内压力最高达到5.8MPa,同时增压过程贮箱压强会有波动,为避免反向压力影响燃气发生器内部工作压强的情况出现,喷管临界压强应大于贮箱反向压力,使喷管处于“壅塞”状态<sup>[7]</sup>,此时喷管出口外界反向压力便不再能影响喷管内的流动,因此设计燃气发生器工作压强至12MPa。喷管临界压强计算按照公式(1)~(2):

$$\beta_{cr} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1)$$

$$P_{cr} = P_a \times \beta_{cr} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $k$ 为燃气比热比,取1.27; $P_a$ 为燃气发生器燃烧室工作压强,取12MPa; $\beta_{cr}=0.5512$ ,此喷管的临界压强 $P_{cr}=6.61$ MPa,大于贮箱最大压强5.8MPa,故贮箱内压强的波动不会影响燃气发生器内部工作压强。

## 2 试验

### 2.1 试验方案与仪器

开展燃气发生器输出性能试验,在样品输入端设计测压孔,通过压力传感器测试燃气发生器内部压强;并且,连接管道与贮箱测试输出性能。贮箱初始容积0.8L,密封膜片打开压强5.0MPa,出口采用等效喉道,控制贮箱内压强为5.0MPa。试验方案见图3。

采用DEWETRON公司DEWE2-A系列数采系统、30MPa传感器、10MPa传感器、K型热电偶(测试温度不大于1200℃),测试燃气发生器内部压强,以及贮箱内压强、温度。

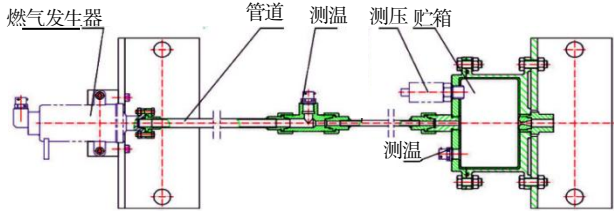


图3 试验方案示意图

Fig.3 Test scheme diagram

## 2.2 试验过程

为了研究过滤结构对燃气发生器内弹道性能的影响，进行不同状态下燃气发生器的输出性能试验。试验产品状态参数见表2。通过试验测试燃气发生器内部压强—时间曲线、贮箱内压强—时间曲线、温度。

表2 试验产品参数

Tab.2 Parameters of test sample

| 编号    | 过滤层相对密度 | 喉径/mm | 贮箱反向压力 |
|-------|---------|-------|--------|
| SY001 | 无       | 2.95  | 有      |
| SY002 | 0.39    | 2.95  | 有      |
| SY003 | 0.39    | 2.95  | 无      |
| SY004 | 0.39    | 5.00  | 无      |
| SY005 | 0.45    | 2.95  | 有      |
| SY006 | 0.52    | 2.95  | 有      |

## 3 结果与讨论

对不同状态试验产品的测试数据进行对比分析。

### 3.1 贮箱反向压力下过滤结构对输出性能的影响

贮箱反向压力存在下，有/无过滤结构的燃气发生器输出性能测试曲线如图4所示。试验结果见表3。

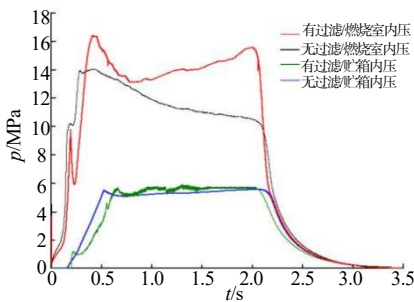


图4 贮箱反向压力下/无过滤结构的压强—时间曲线

Fig.4 Pressure vs time curves with or without filter structure under tank back pressure

表3 试验结果数据

Tab.3 Data of test result

| 状态  | 燃烧室平均压强/MPa | 燃烧室最大压强/MPa | 贮箱内平均压强/MPa | 贮箱内最大压强/MPa |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 有过滤 | 14.3        | 16.5        | 5.2         | 5.5         |
| 无过滤 | 11.8        | 14.0        | 5.0         | 5.4         |

由图4、表3试验结果可以看出，在贮箱反向压力下，有过滤结构的燃气发生器内部压强明显升高，

平均工作压强为 14.3 MPa，压强峰值为 16.5 MPa，与设计状态平均工作压强 12 MPa 不相符。分析原因认为虽然设计的喷口临界压强为 6.61 MPa，大于贮箱最大压强 5.5MPa，此时外界反向压力不影响喷管内的流动及燃烧室工作压强，但药剂燃烧产生的高温固体残渣会附着在过滤层表面，在贮箱内压强作用下，固体残渣更多地堆积在过滤层表面，使得燃气通过面积减小，在过滤层处形成“二次喉道”。此时燃烧室压强将不再由喉径决定，反而由过滤层通气面积决定。随着燃烧过程固体残渣越来越多，内部压强逐渐升高，压强曲线呈现增面燃烧的趋势。而无过滤结构的燃气发生器，即使在反向压力存在下，压强曲线平稳下降，符合减燃面燃烧设计规律。

### 3.2 有过滤结构下贮箱反向压力对输出性能的影响

在有过滤结构条件下，有/无贮箱反向压力的燃气发生器输出性能测试曲线见图5。

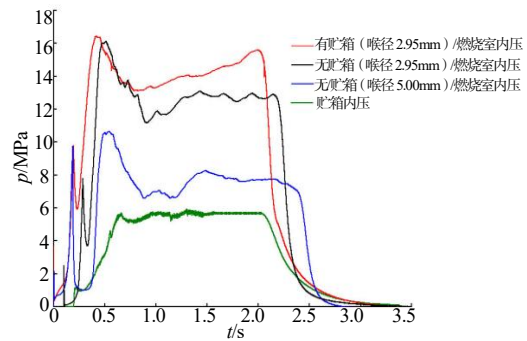


图5 有过滤结构下有/无贮箱反向压力的压强—时间曲线

Fig.5 Pressure vs time curves with or without tank back pressure under adding filter structure

由图5试验结果可以看出，在有过滤结构的条件下，相比有贮箱反向压力下的燃烧室压强，无贮箱反向压力时燃烧室压强较低，平均压强 12.5MPa，与设计值 12 MPa 接近，这是因为动态压强本身会略高于理论计算。同时对比不同喉径的燃气发生器压强曲线，喉径 5.00 mm 的平均工作压强为 7.5 MPa，说明此时燃烧室压强依然由喉道尺寸决定，没有贮箱反向压力作用时药剂燃烧的固体残渣更容易流出喷口，不会堵塞过滤层形成“二次喉道”，进一步验证了贮箱反向压力会影响固体残渣的流出。

### 3.3 贮箱反向压力下过滤层相对密度对输出性能的影响

贮箱反向压力存在下不同相对密度过滤层燃气

发生器的输出性能测试曲线见图6。试验结果见表4。

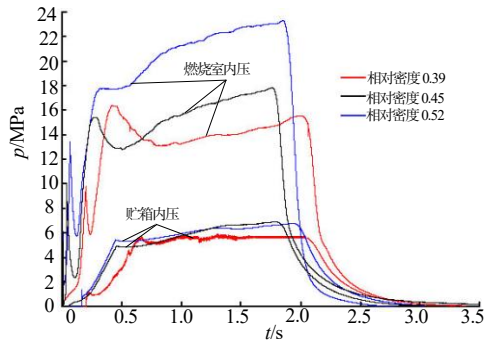


图6 贮箱反向压力下不同相对密度过滤结构的压强—时间曲线

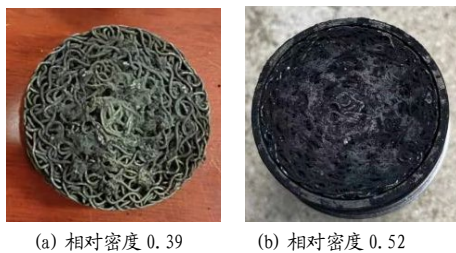
Fig.6 Pressure vs time curves for filter structure with different relative density under tank back pressure

表4 试验结果数据

Tab.4 Data of test result

| 过滤层<br>相对密度 | 燃烧室平均<br>压强/MPa | 燃烧室最大<br>压强/MPa | 贮箱内平均<br>压强/MPa | 贮箱内最大<br>压强/MPa |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.39        | 14.3            | 16.5            | 5.2             | 5.5             |
| 0.45        | 15.2            | 17.5            | 5.0             | 6.3             |
| 0.52        | 20.6            | 23.5            | 5.4             | 6.3             |

由图6及表4试验结果可以看出,在贮箱反向压力下,过滤结构的存在必然会导致燃气发生器内部压强升高,且相对密度越大,燃烧室平均工作压强升高越明显,依次为14.3,15.2,20.6 MPa,相对密度0.52时压强峰值甚至达到了23.5 MPa。分析原因认为,过滤层采用不锈钢丝压制,相对密度越大,压制越紧密,相对的通气面积越小,固体残渣更加容易附着堵塞,如图7所示,在过滤层处形成“二次喉道”,使得内部压强更高。



(a) 相对密度 0.39 (b) 相对密度 0.52

图7 试验后不同相对密度过滤层

Fig.7 Filter with different relative densities after testing

压强过高不仅会导致装药燃烧不稳定,也会造成壳体结构完整性破坏。因此,过滤结构的相对密度选择尤为重要,相对密度较小时无法满足过滤精度及降温吸热的目的,相对密度较大而引起燃气发生器内部压强过高。在尽可能满足过滤固体残渣及降温吸热的前提下,相对密度不能过高,尤其是低燃温复合推进剂固体残渣含量高,基于推进剂在6~18 MPa范围内

燃速压强指数较为稳定,不会出现燃速突变现象,且小型燃气发生器壳体安全系数一般大于1.5(设计工作压力12 MPa),燃烧室最大压强不宜超过18 MPa,因此过滤层相对密度不宜大于0.45。

## 4 结论

本文以某低燃温燃气发生器为研究对象,开展了贮箱反向压力条件下,过滤结构对燃气发生器内部压强影响的试验研究,明确了过滤层相对密度设计准则。得到以下结论:

(1) 燃气发生器内部压强曲线的升高是由贮箱反向压力与过滤结构共同影响造成的;

(2) 即使贮箱反向压力不超过临界压强,燃气发生器内部工作压力依然持续升高,主要是因为反向压力的存在,导致药剂燃烧产生的固体残渣更容易堵塞过滤层而成为二次喉道;

(3) 低燃温复合推进剂固体残渣含量高,过滤结构在满足燃气洁净度及降温吸热的前提下,相对密度不宜大于0.45。

## 参考文献:

- [1] 赵芳,任泽斌.燃气发生器应用综述[J].火箭推进,2019(3):1-8.
- [2] 刘睿,张善科,赫英辉.船用燃气轮机燃气发生器特性仿真与试验研究[J].舰船科学技术,2021(11):116-121.
- [3] 吴晨,江坤,黄明.含金属丝网燃气发生器对气囊充气过程的试验研究[J].兵器装备工程学报,2022(3):213-217.
- [4] 吴昊,王琦,吴瑞德.固体燃气发生器过滤介质比较研究[J].火工品,2017(6):10-13.
- [5] 张明,杨绪印,吴秋.高低燃温组合推进剂下喷管壁面温度边界层影响规律[J].弹箭与制导学报,2016(2):91-93.
- [6] 秦能,贾延斌.过渡金属催化剂对低燃温双基推进剂性能的影响[J].火炸药学报,2014(2):73-77.
- [7] 王新月.气体动力学基础[M].西安:西北工业大学出版社,2006.