

双火药点火器 Y 形三通结构输出性能仿真分析

朱珂¹, 柳洋², 何昆², 李雪飞², 张靖宇¹, 董海平^{1*}

(1.北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2.北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究燃气发生器双火药点火器 Y 形三通结构在不同工况下的输出性能。**方法** 基于经典内弹道理论, 建立某双火药点火器 Y 形三通结构内弹道的仿真模型, 利用 MATLAB 软件的 Simulink 模块, 对内弹道仿真模型进行求解, 对 6 种典型工况 (低温单点火器正常工作、低温双点火器正常工作、低温双点火器之间相差 30 ms 点火、低温双点火器中有 1 个点火器失效、高温单点火器正常工作和高温双点火器正常工作) 下输出端口处燃气压力随时间的变化规律进行对比分析, 对这 6 种工况下的稳定燃烧冲量和压力峰值进行定量对比分析。**结果** 在低温条件下, 双火药点火器正常工作时, 其稳定燃烧冲量为单点火器的 1.7 倍, 有利于燃气发生器中的液氢液氧混合剂的可靠点燃。双火药点火器在相差 30 ms 点火时, 输出性能与双点火器正常工作时差别不大, 即同步性影响较小。双点火器的 1 个点火器失效时, 其 Y 形三通结构稳定燃烧冲量与单点火器相当。在高温条件下, 双点火器正常工作时 Y 形三通结构内的压力峰值为 11.99 MPa, 未超出 Y 形三通管的强度范围, 有较大的裕度, 保证了该双点火器 Y 形三通的结构可靠性。**结论** 该仿真分析结果可以为燃气发生器双火药点火器 Y 形三通结构的设计提供参考。

关键词: 燃气发生器; 内弹道理论; 双火药点火器 Y 形三通结构; Simulink 模块; 稳定燃烧冲量; 压力峰值
中图分类号: V434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)12-0009-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.002

Simulation Analysis of Output Performance of Y-type Three-way Structure of Double Powder Igniter

ZHU Ke¹, LIU Yang², HE Kun², LI Xuefei², ZHANG Jingyu¹, DONG Haiping^{1*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Aerospace Power Research Institute, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work aims to study the output performance of Y-type three-way structure of gas generator double powder igniter under different working conditions. In this paper, based on the classical interior ballistic theory, an interior ballistic simulation model of a Y-shaped three-way structure of a dual-propellant igniter was established. The Simulink module of MATLAB software was used to solve the interior ballistic simulation model. The gas pressure change law with time at the output port under 6 typical working conditions (The single powder igniter worked normally at low temperature; The double powder igniter worked normally at low temperature; The difference between the two igniters was 30ms at low temperature. One of the double igniters failed at low temperature; The single powder igniter worked normally at high temperature; Double powder igniter worked normally at high temperature) was compared and analyzed. The stable combustion impulse and the peak pressure under

收稿日期: 2024-11-11; 修订日期: 2024-12-03

Received: 2024-11-11; Revised: 2024-12-03

引文格式: 朱珂, 柳洋, 何昆, 等. 双火药点火器 Y 形三通结构输出性能仿真分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 9-16.

ZHU Ke, LIU Yang, HE Kun, et al. Simulation Analysis of Output Performance of Y-type Three-way Structure of Double Powder Igniter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 9-16.

*通信作者 (Corresponding author)

these 6 working conditions were quantitatively compared and analyzed. The stable combustion impulse of the double powder igniter was about 1.7 times that of the single powder igniter, which was beneficial to the reliable ignition of the liquid hydrogen liquid oxygen mixture in the gas generator. When the dual-powder igniter was ignited at a difference of 30ms, its output performance was not much different from that of the double powder igniter when it worked normally, that was, the double powder igniter had better synchronization. When one igniter of the double powder igniter failed, the stable combustion impulse of the Y-type three-way structure was equivalent to that of the single powder igniter. Under high temperature conditions, the peak pressure in the Y-type tee structure of the double powder igniter was 11.99 MPa when it worked normally, which did not exceed the strength range of the Y-type tee tube, and had a large margin space, which ensured the reliability of the Y-type tee structure of the double igniter. The simulation results of this paper can provide reference for the optimization design of Y-type tee structure of Y gas generator double powder igniter.

KEY WORDS: gasifier; interior ballistic theory; Y-type three-way structure of double powder igniter; Simulink module; stable combustion impulse; pressurepeak

火药点火器是大推力氢氧火箭发动机的关键部件,用于发动机燃气发生器的点火,其主要由2个钝感电点火器、壳体组件、点火药盒、主装药和喷管组成^[1-2],结构示意图如图1所示。2个钝感电点火器在电流作用下点火,产生高温高压气体点燃点火药盒,然后点燃主装药,最后通过火焰点燃燃气发生器里的液氢液氧混合剂^[3]。火药点火器采用2个钝感电点火器的Y形点火结构,是一种冗余设计,能够提高火药点火器点火可靠性^[4-5]。事实上,这种Y形点火结构作为一种典型的冗余点火结构,广泛地应用于分离螺母装置、小型固体火箭等火工装置中,为提高这些火工装置点火可靠性起了较大的作用^[6]。

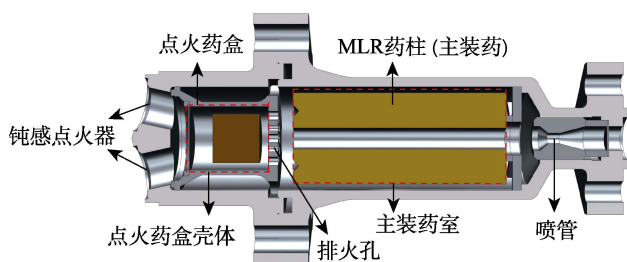


图1 单火药点火器结构
Fig.1 Structure of single powder igniter

采用2个火药点火器构成Y形三通结构,提高火药点火器输出火焰的稳定性和提升燃气发生器的点火可靠性,对于提高氢氧火箭发动机的点火性能和点火可靠性是一种新的设计思路。双火药点火器Y形三通结构是将2个火药点火器通过法兰盘与Y形三通管的2个入口端相连,2个火药点火器接收到点火指令后点火,并产生大量的高温燃气,所产生的燃气产物分别进入Y形三通管的两个输入端,再从其输出端流出,最终进入燃气发生器,点燃液氢液氧混合剂,其结构如图2所示。

目前有多位科研工作者开展了类似Y形三通结构的设计研究工作。王帅等^[7]采用计算流体力学的方

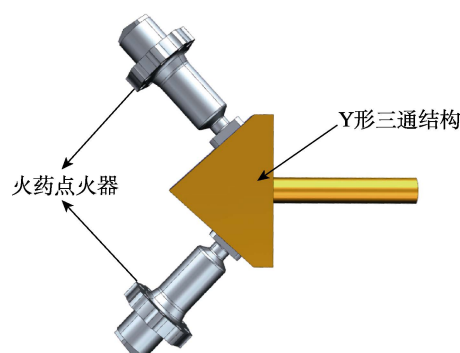


图2 双火药点火器Y形三通结构
Fig.2 Y-type three-way structure of double powder igniter

法对Y形点火结构的燃气压力进行了仿真,得到了做工容腔压力分布规律和Y形点火结构尺寸对燃气压力分布的影响。蒋煜^[8]利用有限元算法对Y形三通结构的安全性进行了定量计算和校核。曹海兵等^[9]利用数值模拟有限元等方法,对不同形状的三通进行了流体流动特性的数值模拟研究,得到了管内流体的流动状况和阻力性能。华剑等^[10]利用Fluent数值模拟软件,对Y形管内部流程以及外部参数对油水分离效率的影响进行了研究。双火药点火器Y形三通结构的冗余设计,有助于提高燃气发生器点火可靠性,然而,Y形三通结构也会带来同步性、单个失效、压力过高等问题。了解双点火器Y形结构在单个失效、存在同步性等不同工况下的输出性能,对能否提供稳定的点火火焰,提升氢氧混合剂的点火可靠性至关重要。

由于火药点火器和火箭发动机的试验成本高,周期长,不易实施,且难以全面获得各种参数,而仿真分析仅需要软件和支持,能够灵活调整仿真模型参数及工况,方便对双火药点火器Y形三通结构在不同工况下的输出性能进行分析。因此,本文基于经典内弹道理论和单火药点火器的仿真模型建立了双火药点火器Y形三通结构的内弹道仿真模型,并利用MATLAB软件的Simulink模块进行求解,得到

了不同工况下双火药点火器 Y 形三通管出口处的压力-时间曲线, 并与单火药点火器输出性能进行了对比, 可为燃气发生器双火药点火器 Y 形三通结构的设计提供依据。

1 仿真模型

1.1 单火药点火器与双火药点火器 Y 形三通结构

单火药点火器由 2 个钝感电点火器、壳体组件、点火药盒、主装药和喷管组成^[1-2], 双火药点火器 Y 形三通结构由 2 个单火药点火器、Y 形三通管和法兰盘构成, 法兰盘用于连接火药点火器与 Y 形三通管。当 2 个火药点火器分别接收到点火指令后, 火药点火器内的钝感电点火器点火并点燃点火药盒中的硼-硝酸钾 (BPN) 药柱。BPN 药柱燃烧释放高能粒子, 释放的能量冲破点火药盒底部的铝箔, 继而成功点燃主装药室内的低燃速双基改性推进剂 (MLR) 主装药。主装药产生大量的燃气, 冲破火药点火器喷管喉部的膜片。随后 2 个火药点火器产生的燃气产物分别进入 Y 形三通管的 2 个输入端, 再从其输出端流出, 最终进入燃气发生器, 点燃液氢液氧混合剂。

1.2 基本假设

基于经典内弹道理论, 建立有热散失的燃气发生器

$$dm_{in1} = dm_{in2} = \begin{cases} P_{MC} A_{e_{in}} \sqrt{\frac{2k_{MC}}{R_{MC} T_{MC} (k_{MC} - 1)} \left[\left(\frac{P_{MC}}{P_{pipe}} \right)^{\frac{2}{k_{MC}}} - \left(\frac{P_{MC}}{P_{pipe}} \right)^{\frac{k_{MC}+1}{k_{MC}}} \right]}, & \frac{P_{MC}}{P_{pipe}} < \left(\frac{k_{MC} + 1}{2} \right)^{\frac{k_{MC}}{k_{MC} - 1}} \\ P_{MC} A_{e_{in}} \sqrt{\frac{k_{MC}}{R_{MC} T_{MC}} \left(\frac{2}{k_{MC} + 1} \right)^{\frac{k_{MC}+1}{k_{MC} - 1}}}, & \frac{P_{MC}}{P_{pipe}} \geq \left(\frac{k_{MC} + 1}{2} \right)^{\frac{k_{MC}}{k_{MC} - 1}} \end{cases} \quad (2)$$

$$dm_{out} = \begin{cases} P_{pipe} A_{e_{out}} \sqrt{\frac{2k_{pipe}}{R_{pipe} T_{pipe} (k_{pipe} - 1)} \left[\left(\frac{P_{pipe}}{P_A} \right)^{\frac{2}{k_{pipe}}} - \left(\frac{P_{pipe}}{P_A} \right)^{\frac{k_{pipe}+1}{k_{pipe}}} \right]}, & \frac{P_{pipe}}{P_A} < \left(\frac{k_{pipe} + 1}{2} \right)^{\frac{k_{pipe}}{k_{pipe} - 1}} \\ P_{pipe} A_{e_{out}} \sqrt{\frac{k_{pipe}}{R_{pipe} T_{pipe}} \left(\frac{2}{k_{pipe} + 1} \right)^{\frac{k_{pipe}+1}{k_{pipe} - 1}}}, & \frac{P_{pipe}}{P_A} \geq \left(\frac{k_{pipe} + 1}{2} \right)^{\frac{k_{pipe}}{k_{pipe} - 1}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_{e_{in}}$ 、 $A_{e_{out}}$ 分别为 Y 形三通管流入口截面积和流出口截面积, m^2 ; k_{MC} 、 k_{pipe} 分别表示火药点火器主装药室和 Y 形三通管内的燃烧气体产物的绝热系数; R_{MC} 、 R_{pipe} 分别表示火药点火器输出端和 Y 形三通管内的燃烧气体常数, $J/(kg \cdot K)$; P_{MC} 、 P_{pipe} 分别表示火药点火器输出端和 Y 形三通管腔室的压力; P_A 为大气压力, MPa。

火药双点火器 Y 形三通结构内弹道的仿真模型^[11-12]。为了简化, 对双火药点火器的燃烧产物流经 Y 形三通管的过程进行必要的假设:

- 1) 不考虑燃烧产物的非定常流动效应, 假设腔室内的温度均匀分布。
- 2) 忽略气体产物分子间的相互作用力, 火药燃气服从诺贝尔-阿贝尔状态方程。
- 3) 不考虑燃气组分变化, 火药力、余容及比热比等均视为常数。
- 4) 整个装置密闭良好, 系统与外界不存在质量交换。

1.3 质量守恒方程

由于在 2 个火药点火器与 Y 形三通管连接处安装了法兰盘, 使其内部腔室密封良好, 与外界无质量交换, 所以根据质量守恒定律可得:

$$dm_{pipe} = dm_{in1} + dm_{in2} - dm_{out} \quad (1)$$

式中: dm_{pipe} 表示 Y 形三通管内的质量流率; dm_{in1} 和 dm_{in2} 为 2 个火药点火器产生的燃烧产物从入口处流入 Y 形三通管内部腔室的质量流率; dm_{out} 为燃烧产物从 Y 形三通管流出的质量流率, 以上质量流率的单位均为 g/s。

根据气体流动理论可知, dm_{in1} 、 dm_{in2} 和 dm_{out} 可以通过式 (2) 和式 (3) 计算得到^[13-14]。

1.4 能量守恒方程

Y 形三通管腔室内的能量转换, 可以根据能量守恒定律表示为:

$$Q_{pipe} = Q_{in1} + Q_{in2} - Q_{out} - Q_{loss} \quad (4)$$

式中: Q_{pipe} 、 Q_{in} 、 Q_{out} 和 Q_{loss} 分别表示 Y 形三通结构内的能量、双点火器的输出能量、Y 形三通结构输出的能量和总的损失能量, 以上能量的单位均为 J。

根据假设3), 则可将式(4)改写为:

$$m_{\text{pipe}} C_{V_{\text{pipe}}} T_{\text{MC}} = m_{\text{in1}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} + m_{\text{in2}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} - m_{\text{out}} C_{P_{\text{pipe}}} T_{\text{pipe}} - Q_{\text{loss}} \quad (5)$$

对式(5)两边同时求导可得:

$$\frac{dT_{\text{pipe}}}{dt} = \frac{dm_{\text{in1}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} + dm_{\text{in2}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} - dm_{\text{out}} C_{P_{\text{pipe}}} T_{\text{pipe}} - dQ_{\text{loss}} - dm_{\text{pipe}} C_{V_{\text{pipe}}} T_{\text{pipe}}}{m_{\text{pipe}} C_{V_{\text{pipe}}}} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, $C_{P_{\text{pipe}}}$ 、 $C_{P_{\text{MC}}}$ 分别为Y形三通管腔室内和火药点火器主装药室中的燃烧产物的恒压比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $C_{V_{\text{pipe}}}$ 表示Y形三通管腔室内火药燃烧产物的恒容比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T_{MC} 、 T_{pipe} 分别表示火药点火器主装药室中和Y形三通管腔室内的温度, K ; m_{pipe} 表示Y形三通管腔室内混合气体的质量, g 。

由于火药燃烧产生的高温高压气体产物分子间的吸引力与腔室内的压力相比很小, 对于高温高压的

非理想气体, 可引入余容 α 以修正理想气体方程, Y形三通管中高温高压的燃气产物均服从诺贝尔-阿贝尔状态方程^[15-17]:

$$P_{\text{pipe}} (V_{\text{pipe}} - \alpha_{\text{pipe}} m_{\text{pipe}}) = m_{\text{pipe}} R_{\text{pipe}} T_{\text{pipe}} \quad (7)$$

式中: α_{pipe} 表示Y形三通管腔室内混合气体的余容。

则对式(7)求导后, 再结合式(6)可以得到考虑热散失的Y形三通管腔室内压力变化率:

$$\frac{dP_{\text{pipe}}}{dt} = \frac{(k_{\text{pipe}} - 1) (dm_{\text{in1}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} + dm_{\text{in2}} C_{P_{\text{MC}}} T_{\text{MC}} - dQ_{\text{loss}} - dm_{\text{out}} C_{P_{\text{pipe}}} T_{\text{pipe}}) + P_{\text{pipe}} \alpha_{\text{pipe}} dm_{\text{pipe}}}{(V_{\text{pipe}} - \alpha_{\text{pipe}} m_{\text{pipe}})} \quad (8)$$

式中: dQ_{loss} 为火药燃烧产物与腔壁对流传热和火药燃烧产物热辐射的热损失总速率^[18-20], 可以通过式(9)得到。

$$dQ_{\text{loss}} = hAw(T_w - T_{\text{pipe}}) + \sigma Aw(A_t T_w^4 - E_m T_{\text{pipe}}^4) \quad (9)$$

式中: h 为恒定的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_w 为容器壁的温度, K ; A_t 是容器壁的吸收率; E_m 表示产物的净发射率; A_w 表示Y形三通管腔室的内容腔和两火药点火器的腔室内的总内壁表面积, m^2 ; σ 为斯特潘波尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ 。

1.5 Simulink 内弹道仿真模型

利用MATLAB软件的Simulink模块来计算上文建立的内弹道模型的数值解^[21]。Simulink模块可以把实现不同功能的模块连接起来, 从而实现更加方便高效的计算。本文在建立Simulink模型时, 将内弹道模型划分为: 双火药点火器的输出模块、Y形三通管内部压力计算模块、Y形三通管内部腔室内温度计算模块、热散失计算模块等。建立的Simulink内弹道仿真模型如图3所示。

2 结果与讨论

2.1 输出性能表征

在火药点火器主装药量和环境温度一定的情况下, 双火药点火器Y形三通结构和单火药点火器的输出气体压力和持续时间, 对能否正常点燃氢氧混合剂起到关键作用^[22-23]。当火药点火器进入稳定燃烧后, 其燃气压力越大或持续时间越长, 越能保证氢氧

混合剂正常点火, 即燃气压力曲线与时间轴围成的积分面积越大, 表明双火药点火器Y形三通结构或单火药点火器输出性能越好。因此, 考虑到燃气压力和持续时间对氢氧混合剂点火的综合影响, 本文把火药点火器处于稳定燃烧阶段产生的燃气压力与持续时间的积分面积定义为稳定燃烧冲量, 将其作为表征双火药点火器Y形三通结构或单火药点火器输出性能的参量, 以此对单火药点火器和双火药点火器Y形三通结构的输出点火性能进行对比。其计算方法为:

$$I = \int_{t_s}^{t_e} P dt \quad (10)$$

式中: t_s 是稳定燃烧段开始时间; t_e 是稳定燃烧段结束时间; P 为Y形三通管出口处或单火药点火器输出出口处的压强。

对于Y形三通结构和单火药点火器工作过程, 还必须考虑到点火器壳体和Y形三通管的强度应在可承受的范围内, 否则壳体将遭到破坏。因此, 压力峰值也是表征其输出性能的一个重要参量, 稳定燃烧冲量和压力峰值的物理含义如图4所示。

2.2 仿真结果分析

根据上述的仿真模型, 对双火药点火器Y形三通结构的输出性能在低温、不同步、1个失效以及高温条件下进行了仿真分析, 并与单火药点火器进行了对比。其中, 该火药点火器点火药盒中的BPN点火药为柱状形装药, 药量为1.32 g, 装填密度为1.664 g/cm^3 , 主装药室中的MLR推进剂为管状形装药, 药量为83 g, 装填密度为1.584 g/cm^3 ; Y形三通管结构入口处直径为8 mm, 出口处直径为12 mm,

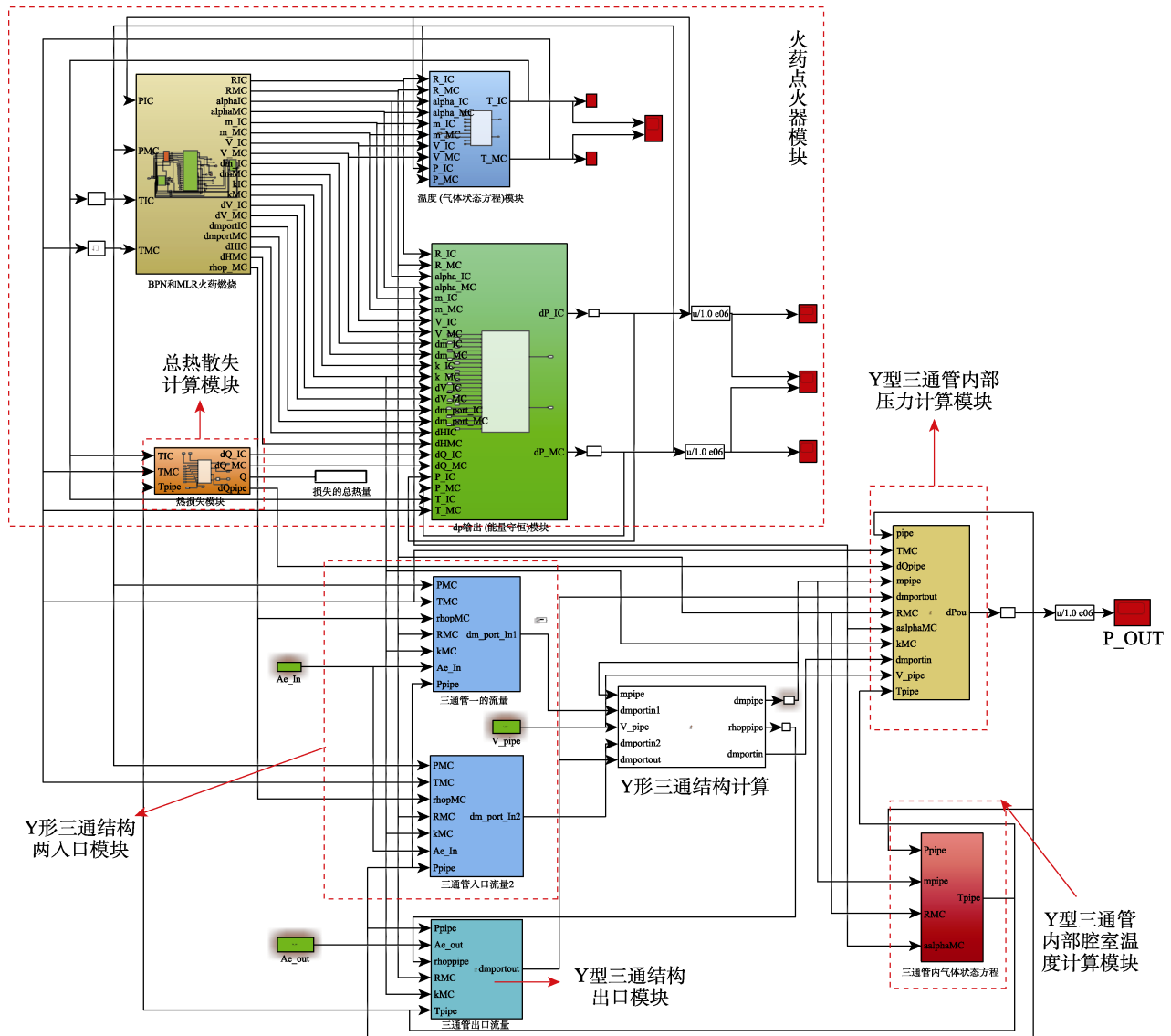


图 3 Simulink 内弹道仿真模型
Fig.3 Interior ballistics simulation model based on Simulink

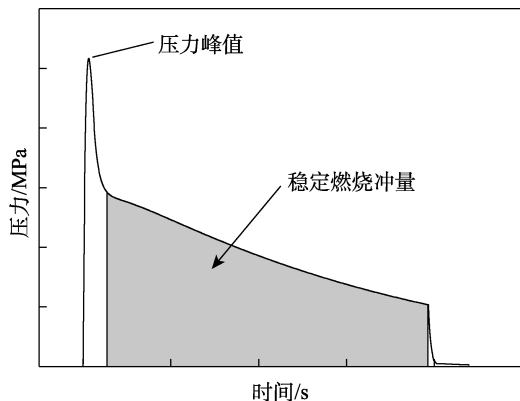


图 4 稳定燃烧冲量和压力峰值含义
Fig.4 Meaning of stable combustion impulse and pressure peak

其余主要仿真参数见表 1。

2.2.1 低温条件下的仿真分析

首先开展了低温 (-40 °C) 条件下, 单点火器点

表 1 燃气发生器双火药点火器仿真参数
Tab.1 Simulation parameters of gas generator double powder igniter

参数	数值
容腔壁低温时温度 T_{w_l}	233.14 K
容腔壁高温时温度 T_{w_h}	323.15 K
对流传热系数 h	200 W/(m ² ·K)
容器壁的吸收率 A_r	0.24
产物的净发射率 E_m	0.24
腔室内总内壁表面积 A_w	0.0142 m ²
斯特潘波尔兹曼常数 σ	5.67×10 ⁻⁸ W/(m ² ·K ⁴)

火的 Simulink 内弹道仿真分析, 计算其出口处的压力峰值和稳定燃烧冲量, 如图 5 所示。然后, 对低温条件下, 对双点火器 Y 形三通结构的 3 种工况 (低温双点火器正常工作, 低温双点火器相差 30 ms 点火, 低温双点火器中有 1 个点火器点火失效) 进行 Simulink 内

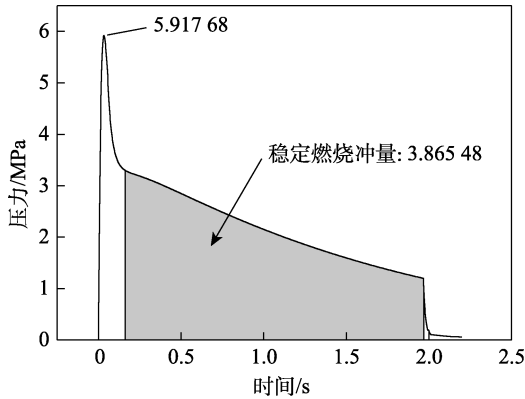


图5 低温单点火器的压力随时间的变化曲线
Fig.5 Pressure-time curve of single igniter at low temperature

弹道仿真分析, 得到结果如图6所示。结合图5和图6得到的各工况下的压力峰值和稳定燃烧冲量见

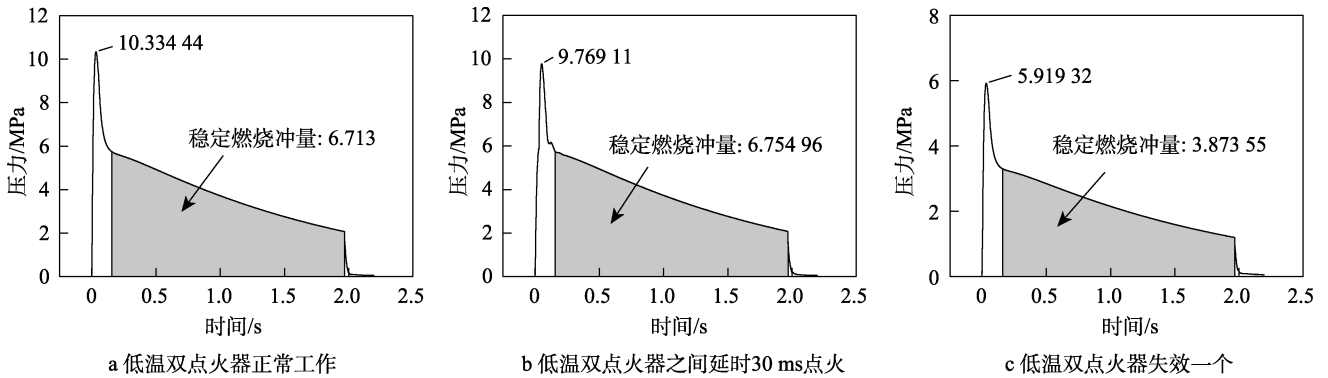


图6 低温双点火器3种工况条件下点火的P-t曲线

Fig.6 Ignition P-t curves of double powder igniter under three working conditions at low temperature: a) double powder igniter working properly; b) ignition delay between the two igniters is 30ms; c) double powder igniter fails one

表2 不同工况下Y形三通管内的压力峰值和稳定燃烧冲量与单火药点火器的对比

Tab.2 Peak pressure and stable combustion impulse in Y-type tee tube are compared with single powder igniter

工况	压力峰值/MPa	稳定燃烧冲量/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
低温单点火器	5.918	3.865
低温双点火器正常工作	10.334	6.713
低温双点火器之间延时30ms点火	9.769	6.755
低温双点火器失效一个	5.919	3.874

表2。

由表2可得, 低温条件下, 双点火器正常工作时, 其Y形三通结构的稳定燃烧冲量是单点火器的1.737倍, 有利于点燃燃气发生器的液氢液氧混合剂, 提高燃气发生器点火可靠性。虽然Y形三通结构的压力峰值增加了约0.75倍, 但由于其强度上限为30MPa, 还留有较大的设计裕度^[24]。对比双点火器同时点火和双点火器之间延时30ms点火2种工况可以看出, 其压力峰值和稳定燃烧冲量较为接近, 表明同步性影响较小, 2个点火器在点火时间不同步的条件下, 也能提高稳定燃烧冲量, 有利于点燃燃气发生器的液氢液氧混合剂。当1个点火器失效时, Y形三通结构的压力峰值和稳定燃烧冲量均与单点火器相差不大, 表明双点火器Y形三通具有冗余设计特性, 在1个点火器失效的情况下, 其稳定燃烧冲量也能保证燃气发生器点火可靠性。

2.2.2 高温条件下的仿真分析

在高温(50℃)条件下, 为了解双火药点火器Y形三通结构压力峰值和稳定燃烧冲量的变化情况, 对高温条件下双点火器正常发火和单点火器正常发火进行Simulink内弹道仿真分析, 结果如图7、8和表3所示。

通过图7、8和表3可以看出, 高温条件下, 双点火器正常工作时, 其Y形三通结构内的压力峰值是单点火器点火管内的1.745倍, 为11.99MPa, 仍远

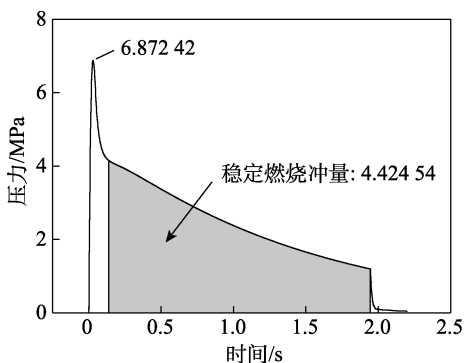


图7 高温单点火器的P-t曲线

Fig.7 P-t curve of single powder igniter at high temperature

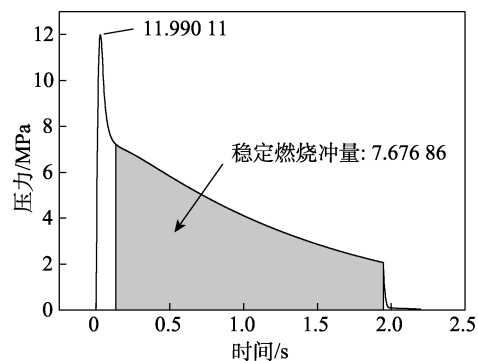


图8 高温双点火器的P-t曲线

Fig.8 P-t curve of double powder igniter at high temperature

表 3 高温下 Y 形三通管内的压力峰值和稳定燃烧冲量与单火药点火器的对比

Tab.3 Comparison of pressure peak and stable combustion impulse of Y-type three-way tube at high temperature with those of single powder igniter

工况	压力峰值 /MPa	稳定燃烧冲量 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$
高温单点火器	6.872	4.425
高温双点火器正常工作	11.990	7.677

小于 30 MPa, 有较大的设计裕度。稳定燃烧冲量是单点火器管内的 1.735 倍, 有利于点燃燃气发生器液氧液氢混合剂, 提高了燃气发生器的点火可靠性。

3 结论

本文针对燃气发生器双火药点火器 Y 形三通结构, 建立了内弹道仿真模型, 并针对多种工况条件下的输出性能进行了分析, 得到结论如下:

1) 无论在低温还是高温条件下, Y 形三通结构内的稳定燃烧冲量约是单点火器点火时的 1.7 倍, 且双火药点火器都比单点火器更有利于点燃燃气发生器的液氢液氧混合剂, 提高了燃气发生器点火可靠性; 同时, 在低温情况下, 双火药点火器在相差 30ms 点火时, 其输出性能与双点火器正常工作时差别不大, 即同步性影响较小。

2) 双点火器当一个点火器失效时, Y 形三通结构的压力峰值和稳定燃烧冲量均与单点火器相差不大, 说明双点火器 Y 形三通具有冗余设计特性, 在一个点火器失效的情况下, 其稳定燃烧冲量与单点火器相当, 能保证燃气发生器点火可靠性。

3) 高温条件下, 双点火器正常发火时, 其 Y 形三通结构内的压力峰值是单点火器点火管内的 1.745 倍, 为 11.99 MPa, 仍远小于 30 MPa, 有较大的设计裕度。

参考文献:

[1] 蔡国飙, 李家文, 田爱梅, 等. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 182-212.
CAI G B, LI J W, TIAN A M, et al. Design of Liquid Rocket Engine[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2011: 182-212.

[2] 宁超, 田干. 火箭发动机理论基础[M]. 3 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2022: 191-251.
NING C, TIAN G. Theoretical Basis of Rocket Engine[M]. 3rd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2022: 191-251.

[3] 钟轶魁. 低温液体火箭发动机循环预冷模拟试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
ZHONG Y K. Experimental Study on Cycle Precooling Simulation of Cryogenic Liquid Rocket Engine[D].

Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[4] 邓康. 容错设计技术在弹上点火系统的应用研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6): 33-37.
DENG K. Application Research of Fault Tolerant Design in Onboard Ignition System[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(6): 33-37.

[5] 盖佳林, 弭艳, 马兵兵. 液体火箭发动机故障诊断系统冗余容错技术研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 1-7.
GAI J L, MI Y, MA B B. Review of Redundancy and Fault Tolerance Techniques for Liquid Rocket Motor Fault Diagnosis System[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(8): 1-7.

[6] 荣吉利, 张涛, 宋乾强. 航天火工装置可靠性小子样分析评价技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 37-42.
RONG J L, ZHANG T, SONG Q Q. Small-Sample Analysis and Evaluation Technology of Aerospace Pyrotechnic Devices' Reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 37-42.

[7] 王帅, 梁晓爱, 唐科, 等. Y 型点火结构瞬态燃气压力的数值模拟[J]. 火工品, 2021(4): 11-14.
WANG S, LIANG X A, TANG K, et al. Numerical Simulation of Transient Pressure Distribution of Y-type Ignition Structure[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(4): 11-14.

[8] 蒋煜. Y 型三通有限元设计校核[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(6): 92-94.
JIANG Y. Finite Element Analysis for Design and Checking of Y Shape Tee[J]. Process Equipment & Piping, 2016, 53(6): 92-94.

[9] 曹海兵, 高莉丽. 不同结构三通管内流体流动特性数值模拟[J]. 广东化工, 2016, 43(13): 72-73.
CAO H B, GAO L L. Numerical Simulation on Flow Characteristics of Different Three-Way Pipe[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(13): 72-73.

[10] 华剑, 胡家浩, 马忠杰, 等. Y 型管式油水分离结构分离特性仿真分析[J]. 工业水处理, 2024, 44(5): 192-197.
HUA J, HU J H, MA Z J, et al. Numerical Simulation of Oil-Water Separation Characteristics in Y-Tube[J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(5): 192-197.

[11] 湛赞, 薛太旭, 蒋超达, 等. 点火器在测压容器内的燃烧模拟分析[J]. 火箭与制导学报, 2022, 42(5): 6-9.
ZHAN Z, XUE T X, JIANG C D, et al. Simulation Analysis of Igniter Combustion in Pressure Measuring Vessel[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(5): 6-9.

[12] 湛赞, 梁晓爱, 严楠, 等. B/KNO₃ 激光点火内弹道仿真研究[J]. 火箭与制导学报, 2020, 40(1): 141-144.
ZHAN Z, LIANG X A, YAN N, et al. The Interior Ballistic Simulation of B/KNO₃ by Laser Ignition[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 141-144.

[13] 潘锦珊, 邹正平, 额日其太, 等. 气体动力学基础[M]. 修订本. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1-233.

- PAN J S, ZOU Z P, HU J. Fundamentals of Gasdynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1-233.
- [14] 刘佩进, 唐金兰. 航天推进理论基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016: 1-134.
- LIU P J, TANG J L. Theoretical Basis of Space Propulsion[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016: 1-134.
- [15] RADULESCU M I. On the Noble-Abel Stiffened-Gas Equation of State[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(11): 111702.
- [16] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 9-130.
- JIN Z M. Gun Interior Ballistics[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2004: 9-130.
- [17] 鲍廷钰, 邱文坚. 内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 50-89.
- BAO T Y, QIU W J. Interior Ballistics[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1995: 50-89.
- [18] 楚化强, 马维刚, 李朝祥. MATLAB在传热学例题中的应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2022: 122-227.
- CHU H Q, MA W G, LI (C /Z)X. Application of MATLAB in Examples of Heat Transfer[M]. Hefei: Hefei Univerisity of Technology Publishing House, 2022: 122-227.
- [19] 郭宝山, 孙靖雅. 传热学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2023: 1-8.
- GUO B S, SUN J Y. Fundamentals of Heat Transfer[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2023: 1-8.
- [20] 张领科. 武器传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2020: 4-121.
- ZHANG L K. Weapon Heat Transfer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2020: 4-121.
- [21] 梁晓爱, 聂建新, 王帅,等. 密闭爆发器中 Al/KClO₄ 点火器的输出性能研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1513-1519.
- LIANG X A, NIE J X, WANG S, et al. Research on Output Performance of Al/KClO₄ Igniter in Closed Bomb[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1513-1519.
- [22] 柳洋, 牛磊, 董海平, 等. 某型火箭发动机点火器故障分析与改进[J]. 科技创新导报, 2021, 18(11): 15-23.
- LIU Y, NIU L, DONG H P, et al. Failure Analysis and Improvement for Rocket Engine Igniter[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2021, 18(11): 15-23.
- [23] 晁李金, 吕秉峰. 点火药量对发射药燃烧性能的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(3): 126-128.
- CHAO L J, LYU B F. Effect of Changing Ignition Dosages on Combustion Properties of Propellants[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(3): 126-128.
- [24] 王鹏, 杜志明. 火工烟火装置裕度研究与设计方法综述[J]. 火工品, 2005(2): 34-38.
- WANG P, DU Z M. Summarize of Margin Research and Design Method of Pyrotechnic Devices[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(2): 34-38.