基于内弹道仿真的火药点火器燃喉比 优化与试验验证

柳洋',于江',李雪飞',马文杰',牛磊',齐环环'

(1.北京航天动力研究所,北京 100076; 2. 陕西应用物理化学研究所,西安 710061; 3.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:目的 减小火药点火器不同药剂批次下的散差,提高其工作可靠性。方法 分析火药点火器不同批次 药剂性能与内弹道数据,发现在恒定燃喉比下,药剂性能波动会显著影响其工作可靠性,因此应根据不同 批次组合下的药剂性能选取合理的燃喉比。首先,通过标准试验测试火药点火器内装药剂的关键性能参数。 然后,通过建立火药点火器内弹道的仿真模型,计算基线燃喉比附近的内弹道参数,输入到基于历史点火 冲量数据建立的正态容许限法模型。最后,在预设燃喉比范围内进行发火试验,并利用正态容许限法计算 出不同燃喉比对应的点火可靠度。结果 共模拟了 8 种水平的燃喉比试验,计算出对应的可靠度为 0.177 242~0.999 999。根据模型计算出的可靠度及火工品相关标准的要求,确定合理的燃喉比,并增加样本,进 一步验证其可靠度。此外,在选定燃喉比附近进行的裕度试验,试验数据均符合预期。结论 通过内弹道仿 真建模,结合可靠性试验数据分析,为火药点火器优选了燃喉比,工作可靠度达到了 0.999 908,比改进前 的可靠度 0.999 有了显著提升。

关键词:火药点火器;内弹道仿真;火工品可靠性;正态容许限法;燃喉比;点火冲量 中图分类号:TJ450 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2022)12-0026-07 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.005

Optimization and Experimental Verification of Fuel Throat Ratio of Gunpowder Igniter Based on Interior Trajectory Simulation

LIU Yang¹, YU Jiang², LI Xue-fei¹, MA Wen-jie¹, NIU Lei³, QI Huan-huan¹

(1. Beijing Aerospace Power Research Institute, Beijing 100076, China; 2. Shaanxi Institute of Applied Physical Chemistry, Xi'an 710061, China; 3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the dispersion of different batches of powder igniter and improve its working reliability. Based on the analysis of the performance and internal ballistic data of different batches of gunpowder igniter, it was found that

Corresponding author: YU Jiang (1979-), Male, Senior engineer, Research focus: initiating explosive material and explosive device design. **引文格式:** 柳洋, 于江, 李雪飞, 等. 基于內弹道仿真的火药点火器燃喉比优化与试验验证[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 026-032.

LIU Yang, YU Jiang, Li Xue-fei, et al. Optimization and Experimental Verification of Fuel Throat Ratio of Gunpowder Igniter Based on Interior Trajectory Simulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 026-032.

收稿日期: 2022-11-23; 修订日期: 2022-12-03

Received: 2022-11-23; Revised: 2022-12-03

作者简介:柳洋(1988-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为液体火箭发动机结构及火工品设计。

Biography: LIU Yang (1988-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: liquid-propellant rocket engine structure and initiating explosive device design.

通讯作者:于江(1979—),男,高级工程师,主要研究方向为火工药剂研制和火工品设计。

the performance fluctuation of the agent would significantly affect its working reliability under the constant fuel throat ratio. Therefore, a reasonable fuel throat ratio should be selected according to the performance of the agent under different batch combinations. First, key performance parameters of the new batch of gunpowder igniter were tested by standard test. Then, the internal ballistic parameters near the baseline fuel throat ratio were calculated by establishing the simulation model of gunpowder igniter internal ballistic parameters, which were input into the normal allowable method model based on the historical ignition impulse data. Further, the ignition test was carried out in the preset range of combustion and fuel throat ratio, and the ignition reliability corresponding to different combustion and fuel throat was calculated with the normal allowable limit method. A total of 8 kinds of combustion and fuel throat tests were simulated, and the corresponding reliability was calculated, from 0.177 242 to 0.999 999. According to the reliability calculated by the model and the requirements of related standards of pyrotechnics, the reasonable fuel throat ratio was determined, and more samples were added to further verify its reliability. In addition, the margin test was carried out near the selected fuel throat ratio, and the experimental data were in line with expectations. Through the internal ballistic simulation modeling combined with the reliability test data analysis, the fuel throat ratio is optimized for the gunpowder igniter, and the working reliability approaches 0. 999 908, which is significantly improved compared with the reliability of 0.999 before the improvement.

KEY WORDS: gunpowder igniter; interior trajectory simulation; reliability of pyrotechnics; normal admissibility method; fuel throat ratio; impulse of ignition

火药点火器是我国某新型火箭发动机的重要组件,其功能是利用固体推进剂的燃烧火焰,为液体发动机内部工质提供初始点火能源。火箭发动机的工作介质为液氢和液氧,属于超低温燃料,因此要求该火药点火器在低至-40℃环境下应可靠工作,对于配套产品提出了较高的要求。火药点火器由壳体、电点火器、点火药盒、推进剂等组成,其结构和原理接近燃气发生器。在产品研制过程中,调研国内相关文献表明^[1-2],具备低温、大流量、体积小、点火时间长(推进剂低燃速)且高可靠性的产品较少,多为常温或高燃速推进剂火药点火器,因此研制难度较大。本文将重点介绍其关键参数优化及可靠性提升工作。

1 火药点火器介绍

1.1 内部结构

该火药点火器(结构见图1)内部传火序列构成 比较复杂,包含3个发火单元,分别承担点、传、输 等3个不同的功能,构成3级传火序列。电点火器属 始发器件,内装点火药,点火药盒起到"接收能量— 激发放大—再次输出"的作用,是其核心组成和关键 部件,内部装有点火药和推进剂2种药剂。下游的推 进剂可实现长时稳定燃烧,是该火药点火器实现其功 能的基础。



图 1 火药点火器结构 Fig.1 Schematic diagram of gunpowder igniter structure

1.2 主要参数

火药点火器的基本工作参数见表 1。其中,考虑 到火药点火器壳体结构强度,工作压力设计上限为 30 MPa,为提高结构强度可靠性,工作压力尤其是点 火峰应尽可能低。初始燃喉比是火药点火器的一个重 要结构参数,当推进剂状态和初温一定时,燃喉比会 直接影响火药点火器燃烧室压力,进而影响其工作状 态^[3]。燃喉比的定义及计算方法见式(1)。

$$K = \frac{A_{\rm b}}{A_{\rm t}} \tag{1}$$

式中: *A*_b为推进剂的初始燃面面积, m²; *A*_t为点 火器出口喷管的流通面积, m²; *K*为燃喉比。由于火

表 1 点火器主要工作参数(-40℃) Tab 1 Kay working percentation of ignity (10℃)

rab. r Key working parameters of igniter (-40°C)									
Working time/s	Working pres- sure/MPa	Propellant burning rate/(mm \cdot s ⁻¹)	Flow of gunpowder/($g \cdot s^{-1}$)	Temperature output/K	Nozzle throat diameter/mm				
1.1~1.8	≤30	3~5	≥ 40	800~1 000	3.2~3.9				

药点火器的初始燃面面积是确定的,且不便于调整, 后续计算及分析中用便于测量的喷管喉部直径 *d* 表 征燃喉比 *K*。

1.3 存在问题

火药点火器是否能可靠工作主要取决于燃烧室 中推进剂能否稳定自持燃烧。由于该点火器所使用的 推进剂燃速较低,且在低温下工作,进入稳定燃烧前, 往往无法自持,需上游持续传火,而该火药点火器存 在多级传火序列交错和相互作用的现象,对整体性能 产生了影响^[4-6]。

对于火药点火器,初始点火阶段非常关键,该阶段的工作参数主要受药剂性能的影响较大。如药剂出现不稳定燃烧,推进剂处于临界燃烧状态,即点火阶段燃烧室压力低于或接近推进剂的临界压力(如图2所示),火药点火器的工作可靠性很低,甚至可能导致火药点火器熄火,必须进行改善^[7]。推进剂的临界压力是推进剂的固有特性,是由其牌号决定的,该火药点火器选用推进剂的临界压力为 3.5 MPa。



图 2 不稳定燃烧状态 Fig.2 Unstable combustion state

1.4 低温点火影响因素初步分析

分析低燃速推进剂特性可知^[8-10],影响低燃速推 进剂点火的主要因素为初温、点火持续时间、燃烧室 压力和燃烧流速等。对于该火药点火器,工作初温一 定,燃烧流速的影响因素较多,在火药点火器结构不 变的情况下,不便于定量控制。因此,考虑从点火持 续时间、燃烧室压力出发,进行重点分析和优化。工 作曲线的定义如图3所示。其中,P_d为点火结束瞬态 压力,应当高于推进剂的临界压力3.5 MPa; P_{ip}为点 火峰; t_a为工作时间; t_d为点火持续时间,应大于推 进剂所需的点火持续时间 t,t 由式(2)计算获得。 通过分析可知,上述2个参数是决定点火过程稳定性 的关键参数,如低于临界值,会导致熄火或下游推进 剂不稳定燃烧。

$$t = \frac{\lambda_{\rm p} c_{\rm p} \rho_{\rm p}}{a_{\rm c}^2} \frac{1}{\pi} \left(\frac{\theta_{\rm ig} - \theta_0}{\theta_{\rm g} - \theta_0} \right)^2 \tag{2}$$

式中: λ_p 为推进剂的热传导系数, W/(m·C); c_p 为推进剂的比热容, J/(kg·C); ρ_p 为推进剂密度, kg/m³; α_c 为对流换热系数, W/(m²·C); θ_{ig} 为推进剂 的发火温度, C; θ_g 为火药燃气温度, C; θ_0 为系统 初始温度, C。



图 3 低温典型工作曲线 Fig.3 Typical working curve at low temperature

$$\alpha_{\rm c} = 0.024 \ 7 \frac{\lambda}{\mu^{0.8}} \times \frac{\dot{m}^{0.8}}{d^{1.8}} \tag{3}$$

式中: λ 为热传导系数; μ 为物性参数; \dot{m} 为质 量流率;d 为特征尺寸。经计算,t 约为 150 ms,因 此 t_d 应大于 150 ms^[11]。

2 提出改进

2.1 建立并修正内弹道仿真模型

由于火药点火器实际工作过程非常复杂,各影响 因素存在耦合,上述公式只能对火药点火器工作过程 进行简单分析, 计算误差较大。为进一步分析火药点 火器的工作过程,利用 MATLAB 的 Simulink 模块计 算建立点火器的内弹道模型。内弹道模型考虑了点火 药盒内 2 种点火药、燃烧室内推进剂的点火燃烧过 程、铝箔和膜片的破裂过程、点火药盒与顶盖的间隙 产生和泄露以及由于对流和辐射产生的热散失,忽略 点火延迟时间和电爆管中装药的燃烧。假定点火后, 点火药盒中2种火药共同燃烧,在点火药盒内建压, 随后铝箔失效,高能粒子流从排火孔中流出,燃烧室 中压力快速上升,燃烧室内压力和达到推进剂临界点 火温度和临界点火压力后,推进剂开始燃烧,随后火 焰冲破膜片,从喷管喷出,实现点火功能。建立的仿 真模型如图4所示,主要包括3种药剂燃烧计算模块、 能量守恒模块、气体状态方程模块、热散失计算模块、



图 4 内弹道仿真模型 Fig.4 Interior ballistic simulation model

铝箔打开时刻和膜片打开时刻判断模块以及记忆和 显示模块等^[12]。

模型建立后,利用火药点火器已有的近 200 个样本的试验数据对模型进行修正与训练,修正后,模型的预测误差不超过 5%。从厂家获取火工药剂的燃速、爆燃等关键性能参数,将其输入到内弹道仿真模型中。喷管喉径分别取 3.2~3.9 mm,计算出对应的内弹道参数。通过模型仿真的火药点火器工作曲线如图 5 所示。



图 5 不同喷管喉径下的内弹道仿真曲线 Fig.5 Simulation curves of interior trajectory under different nozzle diameters

训练后的模型还具备临界燃喉比-点火边界预测的功能,如图 6 所示。图 6 中的 3 条实线均为实际发火试验数据,虚线为模拟的边界线。经试验证明,当火药点火器工作在边界线以下区域时,往往会发生不稳定燃烧或熄火^[13]。例如,喷管喉径 3.9 mm 样本在试验中熄火,喷管喉径 3.6、3.7 mm 样本在试验时正常工作。

2.2 利用正态容许限可靠性模型计算可靠度

正态容许限是目前较为成熟的小样本可靠性分



图 6 点火边界仿真与验证 Fig.6 Simulation and verification of ignition boundary

析方法,该火药点火器输出参数均为计量型数据,因 此选用正态容许限进行可靠性分析^[14-16]。

正态容许限分析的关键是选取准确、有区分度的 评估参数。根据 1.4 节的分析,火药点火器点火段的 压力和时间对其能否稳定工作至关重要。经分析大量 历史数据,最终选取点火阶段的压力-时间积分—— 点火冲量 I 点头作为评估参数,其定义及计算方法为:

$$I_{\underline{k},\underline{k}} = \int_{0}^{t_{\mathrm{d}}} P \mathrm{d}t \tag{4}$$

式中: P 为火药点火器燃烧室压强, MPa; t_d 为 点火时间, s。点火冲量综合了点火压力 P 和点火时 间 t 这 2 方面的因素,作为对点火器点火能力的重要 监测指标。不同喷管喉径下的点火冲量有显著差异, 非常适合作为表征火药点火器工作稳定性的敏感性 能参量。点火冲量的物理含义如图 7 所示。对于不同 工况下的试验,点火冲量的计算方法是唯一的,可以 用来分析不同工况点火器的工作特性差异^[17]。统计点 火器成功发火历史数据,确定点火冲量为单侧边界, 其临界下限为 0.87。



图 7 点火冲量含义 Fig.7 Schematic diagram for the meaning of ignition impulse

利用根据内弹道仿真获得的参数计算点火冲量, 并进行正态性检验。满足条件后,输入上述可靠性模 型,计算出不同喷管喉径下的可靠度,结果见表 2。 考虑到过小的喷管喉径会导致高温工况工作压力较 高,影响产品结构强度的可靠性,因此在可靠性满足 要求的前提下,初步确定火药点火器喷管喉径为 3.6 mm。

表 2 喷管喉径与点火器工作可靠度的关系 Tab.2 Relationship between nozzle throat diameter and working reliability of the igniter

Serial	<i>d</i> /mm	$I_{\pm k}/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	Degree of reliability					
1	3.2	3.17	0.999 999					
2	3.3	2.25	0.999 999					
3	3.4	1.73	0.999 999					
4	3.5	1.39	0.999 998					
5	3.6	1.15	0.999 908					
6	3.7	1.04	0.979 487					
7	3.8	0.90	0.661 538					
8	3.9	0.81	0.177 242					

2.3 试验验证并计算不同燃喉比下的可靠度

以初步确定的喷管喉径 *d*=3.6 mm 为基线,分别 进行喷管尺寸 3.7 mm(*d*_{+0.1})在-40 ℃、3.5 mm(*d*_{-0.1}) 在 50 ℃下的试验,每组试验至少 3 个样本,以验证 其不同工况下的裕度,工作曲线如图 8、图 9 所示。



图 8 喉径 3.7 mm 低温裕度试验曲线 Fig.8 Low temperature margin test curve at a throat diameter of 3.7 mm



图 9 喉径 3.5 mm 高温裕度试验曲线 Fig.9 High temperature margin test curve at a throat diameter of 3.5 mm

分析数据,用正态容许限模型分别计算不同试验 条件下的可靠度,结果见表 3。火药点火器工作可靠 度综合了结构强度可靠性,这是高温工况应重点关注 的,具体方法不再详细展开。

可以看出,随着喷管喉径的减小,低温点火"凹 坑"现象明显改善,同时点火峰相应升高,且3.5 mm 喷管 50 ℃工作点火峰为 24.28 MPa,距产品设计上限 30 MPa仍有较大安全裕度。3.5 mm 喷管-40 ℃的平 均点火冲量为 1.03,为4 组最低,与边界值 0.87 仍 有一定空间,对应的可靠度 0.999 995 也处于较高水 平。整体变化趋势符合理论分析及模型仿真结果。

通过试验数据计算出的可靠度与模型仿真结果 一致性好,因此,喷管喉径 *d*=3.6 mm 的选取是合理 的,有较为充足的裕度^[18-21]。

表 3 火药点火器可靠度试验数据分析 Tab.3 Analysis of reliability test data of gunpowder igniter

Tub. 5 Mary is of fendomy lest data of galipowder igneer								
Serial	Temperature/°C	Sample size	<i>d</i> /mm	Average of $I_{\pm k}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	Degree of reliability			
1	-40	3	3.7	1.03	0.999 995			
2	-40	11	3.6	1.15	0.999 999			
3	50	3	3.5	2.81	0.999 999			
4	50	7	3.6	2.77	0.999 998			

2.4 小结

火药点火器燃喉比优化与改进的主要流程如图

10 所示。通过理论仿真结合试验验证,最终确定了 火药点火器燃喉比的最终状态,此时的可靠度达到了 0.999 908,比改进前的可靠度 0.999 有了显著提升。



图 10 改进流程 Fig.10 Improved flow chart

3 结论

本文针对某火药点火器在低温下不稳定燃烧现 象提出了改进措施。通过内弹道仿真模型计算获得火 工品内弹道参数,设计并采用点火冲量作为评价点火 器点火性能的灵敏参量,运用内弹道仿真模型和正态 容许限模型的方法评估可靠性,大幅减少了发火试验 数量。经试验验证表明,改进效果明显,试验效率 高,通过内弹道仿真优选的燃喉比裕度,可靠度达 到了 0.999 908。同时,该方法为业内其他同类燃气 发生器设计提供了借鉴,避免出现低温下不能可靠 点火的问题。

参考文献:

- (苏)阿列玛索夫(АлемасовВ.Е.). 火箭发动机原理[M]. 张中钦,等译. 北京: 宇航出版社, 1993.
 ALYMASOV B E. Principle of Rocket Engine[M]. ZHANG Zhong-qin, et al. Translated. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1993.
- [2] HICKS B L. Theory of Ignition Considered as a Thermal Reaction[J]. The Journal of Chemical Physics, 1954, 22(3): 414-429.
- [3] 柳洋,何昆,牛磊,等. 燃喉比对氢氧发动机点火器的低温点火性能影响[J].火工品,2021(4):15-18.
 LIU Yang, HE Kun, NIU Lei, et al. Influence of Fuel Throat Ratio on Low Temperature Ignition Performance of Propellant Igniter of Hydrogen-Oxygen Engine[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(4): 15-18.
- [4] HASA SP-8051. Solid Rocket Motor Igniters[S].
- [5] 杨金虎. 多级旋流分级燃烧室点火/熄火特性、机理和 预测方法研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院 工程热物理研究所), 2020.

YANG Jin-hu. Performance, Mechanism and Prediction of Ignition and LBO for Multi-Swirl Staged Injector[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.

- [6] WANG J. Experimental Study of some Ignition Problems of Small Solid Propellant Rockets[C]//13th Propulsion Conference. Orlando: AIAA, 1977: 902.
- [7] 刘攀. 点火药的低压燃速规律及点火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
 LIU Pan. Study of Ignition Powder Burning Rate Law and Ignition Ability under Low Pressure Environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [8] 史斐菲. 典型爆破片爆破压力的温度影响研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
 SHI Fei-fei. Study on the Effect of Temperature on the Bursting Pressure of Bursting Discs[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [9] 陈军,董师颜. 一种确定侵蚀函数的新方法[J]. 推进技术, 1998, 19(3): 13-16.
 CHEN Jun, DONG Shi-yan. A New Method to Form Erosive Function[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(3): 13-16.
 [10] 陈军,国体复合推进到业等华动机侵蚀里阻全教的颈
- [10] 陈军. 固体复合推进剂火箭发动机侵蚀界限参数的预测方法与应用[J]. 弹道学报, 2020, 32(3): 30-34.
 CHEN Jun. Approach and Application Predicting Critical Erosion Parameters of Solid Composite Propellant Rocket Motors[J]. Journal of Ballistics, 2020, 32(3): 30-34.
- [11] 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(11): 15-23.
 LIU Yang, NIU Lei, DONG Hai-ping, et al. Failure Analysis and Improvement forRocket Engine Igniter[J].
 Science and Technology Innovation Herald, 2021(11): 15-23.
- [12] 李建,罗思璇,吴飞春,等.固体轨控发动机用环形点 火器优化设计[J].火工品,2017(5):1-3.
 LI Jian, LUO Si-xuan, WU Fei-chun, et al. The Optimum Design on Annular Igniter of Solid Divert Motor[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(5): 1-3.
- [13] 翁国栋,赵兵,李前,等. 试验温度对气瓶阀用爆破片的影响[J]. 阀门, 2018(6): 9-10.
 WENG Guo-dong, ZHAO Bing, LI Qian, et al. Research on the Effect of Temperature on the Bursting Pressure of

Rupture Discs for Cylinder Valve[J]. Valve, 2018(6): 9-10.

[14] 董海平, 董笑, 张天飞, 等. 加严条件下火工品高可靠 性试验验证[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 221-224.
DONG Hai-ping, DONG Xiao, ZHANG Tian-fei, et al. Reliability Verification of Initiating Devices Based on

Rigorous Test[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(3): 221-224.

 [15] 温玉全,张利敏,洪东跑.基于感度的火工品发火可靠 性试验数据分析[J]. 兵工学报,2010,31(11):1498-1501.
 WEN Yu-quan, ZHANG Li-min, HONG Dong-pao.
 Analysis on Reliability for Explosive Initiator Based on

Sensitivity[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1498-1501.

- [16] WANG Lei, CHEN Shao-bin. The Analysis of the Causes of Cartridge Igniter in Industrial Boiler Water Cooling Wall[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Informatics, Cybernetics, and Computer Engineering. Melbourne: Springer, 2011
- [17] 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 Peng, DU Zhi-ming. Summarize of Margin Research and Design Method of Pyrotechnic Devices[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(2): 34-38.

- [18] 张强.火工品可靠性评定方法的分析与研究[J]. 舰船 科学技术, 2010, 32(5): 92-94.
 ZHANG Qiang. Analysis and Study on Reliability Assessment Method of Initiating Devices[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(5): 92-94.
- [19] 田玉斌, 王典鹏. 火工品发火可靠性小样本鉴定试验 方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 426-431.
 TIAN Yu-bin, WANG Dian-peng. A Qualification Test Method for Firing Reliability of Initiator with Small Samples[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4): 426-431.
- [20] 于江,柳洋.一种采用自定义参量实现小样本评估可 靠性的方法[J].火工品,2022(5):13-16.
 YU Jiang, LIU Yang. A Method for Assessing Reliability in Small Samples Using Custom Parametrics[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(5):13-16.
- [21] MC ALEVY R F, COWAN P L, SUMMERFIELD M. The Mechanism of Ignition of Composite Solid Propellants by Hot Gases[M]. New York: AIAA, 1960: 623-652.

责任编辑:刘世忠