

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0018-04

某点火器工作故障分析及改进

海涵, 涂军, 侯晓静

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳, 471009)

摘要: 针对某点火器在试验过程中发生管体破碎和输出压强峰值较高的问题, 分析了导致该工作故障的可能原因, 认为点火过程中药柱内外通道压差过大导致药柱压碎后增大了燃面, 从而使压强异常升高。对药柱挡板结构进行了优化设计, 以期减小药柱内外通道的压差, 并通过对点火过程的流场仿真验证了其可行性。最终试验结果表明改进措施有效, 输出压强峰值满足设计要求, 提高了点火器工作的安全性和可靠性。

关键词: 点火器; 管体破碎; 压强峰; 故障分析; 流场仿真

中图分类号: TJ45+4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.004

Failure Analysis and Design Improvement of Some Ignitor

HAI Han, TU Jun, HOU Xiao-jing

(China Airborne Missile Academy, Luoyang, 471009)

Abstract: Aimed at the problem of tube crushing and high output peak pressure of an ignitor, the possible reasons for the failure were analyzed. It was speculated that the pressure difference between the internal and external channels of the grain was too large, which led to the increase of combustion surface after grain crushing, then the pressure was risen unusually. The back plate structure was optimized to reduce the pressure difference between the internal and external channels of the grain, and the feasibility of this method was verified by simulating the flow field during ignition. The verification test proves that the improvement measures are effective, and the output peak pressure value meet the design requirement, the safety and reliability of the ignitor are improved.

Key words: Ignitor; Tube crushing; Peak pressure; Failure analysis; CFD

点火器作为固体火箭发动机的重要组成部分, 应安全可靠地点燃发动机装药。在发动机工作全过程中, 点火器的装药管体应保持结构完整, 不产生影响发动机正常工作的喷出物。某点火器在方案摸底阶段进行常温(+23°C)试验时, 点火后15ms左右测压容器内出现约0.7 MPa压强峰(设计输出压强峰值为0.20~0.45 MPa), 并且试验后拆解发现点火器管体破碎。针对此问题, 本文开展故障分析, 重新设计了挡板结构, 通过对点火过程的流场仿真验证了其可行性; 最终试验结果表明改进措施有效, 输出压强峰满

足设计要求, 提高了点火器工作的安全性和可靠性。

1 点火器结构

本研究点火器结构见图1。如图1所示, 点火器主要由2发电爆管、管体、药柱、挡板和前后支架组成, 其中药柱为硼/硝酸钾, 管体采用全钢内衬, 外表面采用高硅玻璃钢缠绕成型, 单边厚度4 mm。点火器能量输出方式为侧喷, 共有3组侧喷口, 每组2个对称分布。

收稿日期: 2023-04-29

作者简介: 海涵(1995-), 男, 助理工程师, 主要从事火工品技术研究。

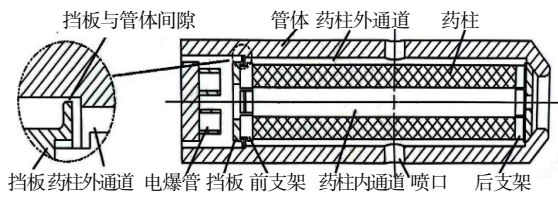


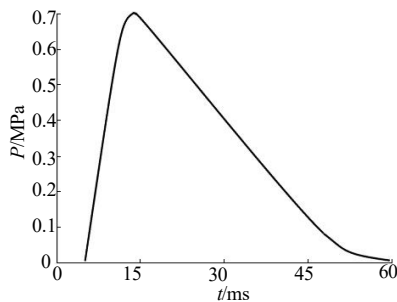
图1 点火器结构

Fig.1 Structure sketch of the ignitor

2 故障现象与原因分析

2.1 故障现象

故障件在测压容器内进行常温(+23℃)试验,测得输出 $P-t$ 曲线(测压容器内部压强,非点火器内部压强)如图2所示。由图2可以看到,点火后15ms左右达到输出压强峰值,约0.7MPa,而输出压强峰值设计范围为0.20~0.45MPa;压强上升和下降速率较大,点火器工作时间不足60ms,小于设计工作时间90~140ms。

图2 故障件 $P-t$ 曲线Fig.2 $P-t$ curve of the failure ignitor

故障件残骸见图3,管体断裂位置距点火器头部盖板43mm,高硅氧玻璃钢已被撕裂为碎片状。故障发生后,对试验方法及流程进行检查,结果未发现异常。



图3 故障件残骸

Fig.3 Wreckage of the failure ignitor

2.2 原因分析

对故障原因进行分析。一方面,由于点火器工作时间明显小于设计值,且输出压强峰较高,因此可以

推断,药柱在点火过程中出现了燃速过快或燃面异常增大的情况。因为该点火器完全借用类似成熟型号产品的药柱,可以排除其配方成分错误或混制不均等因素导致燃速过快的问题;另外,点火器装配完成后均要经过X光检测药柱结构,因此药柱在点火前已经断裂导致燃面增大的因素也可以排除,而点火过程中药柱受力断裂导致燃面增大的因素不能排除。另一方面,根据故障件残骸可以判断,点火器存在管体承压能力不足或点火过程中内压(点火器内部压强,非测压容器内部压强)过高的可能。由于点火器内部最大工作压力设计值为1.5~3.3MPa,每发管体装配前均要经过计量检查及承压能力检测,检测压力5.0MPa,管体强度裕度不小于1.5,因此可以排除管体承压能力不足的因素,而点火过程中点火器内压过高的因素不能排除。

综合上述两方面的分析,推测造成该工作故障的原因可能为:药柱在点火过程中受力后发生断裂增大了燃面,导致局部高压的产生,致使管体断裂,同时点火器工作时间缩短,输出压强峰也异常升高。

对点火器内部结构进一步分析,结合图1可以看到,电爆管产生的高温高压燃气经过挡板内孔及挡板与管体间隙进入药柱的内外通道。由于挡板与管体间隙很小,可能导致药柱外通道进气不畅,致使内外通道压差较大,从而将药柱压碎,导致燃面异常增大。

3 设计改进与结果分析

3.1 挡板结构优化设计

基于以上分析,对挡板结构进行优化设计:将挡板四周开槽,提升药柱外通道的进气能力,同时将原挡板的内孔适当扩大以平衡内外通道的进气效率。优化前后的挡板结构如图4所示。

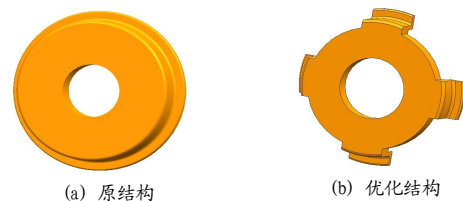


图4 优化前后的挡板结构

Fig.4 The back plate structure before and after optimization

3.2 挡板结构优化设计仿真分析

基于优化前后的挡板结构,采用商业软件 Fluent 对点火过程的流场进行仿真计算^[1-2],对比 2 种结构下药柱内外通道的压差。

3.2.1 计算网格

为了简化计算,不考虑电爆管内部发火的复杂过程,直接将电爆管输出燃气作为流域初始入口,采用四面体网格对模型进行划分,并对挡板处进行局部加密处理,网格数量约 146×10^4 ,如图 5 所示。

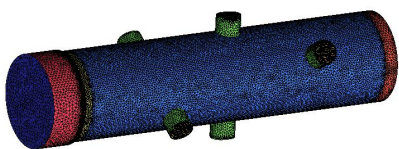


图 5 计算网格
Fig.5 Computational grid

3.2.2 控制方程

本研究仅对气相流场进行计算,不考虑硼/硝酸钾燃烧产生的固体颗粒对流场的影响。流场计算采用非定常可压缩 Navier-Stokes (N-S) 方程,以连续、动量和能量方程为基础,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型,近壁区采用标准壁面函数法处理。

3.2.3 边界条件

根据理论计算和以往试验数据,对边界条件进行简化处理,分别为:

(1) 电爆管输出燃气采用压力进口,持续输出时间 5 ms,压强和温度随时间变化如图 6 所示,其中“0”点指电爆管接通点火信号的时刻。

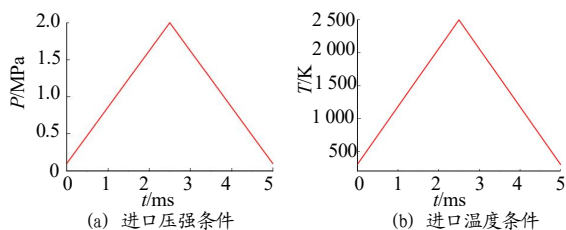


图 6 进口边界条件
Fig.6 Inlet boundary condition

(2) 药柱内外表面着火温度为 700 K,当温度低于 700K 时,药柱表面采用无滑移绝热壁面;当温度大于等于 700K 时,药柱表面采用质量流量进口,进口温度为 2 500K,质量流量采用式 (1) 计算:

$$\dot{m} = k\rho v A \quad (1)$$

式 (1) 中: \dot{m} 为硼/硝酸钾燃烧产生的气相质量

流量; k 为硼/硝酸钾燃烧产生的气相质量占硼/硝酸钾质量的百分比 (药柱燃烧会产生大量固体颗粒,本研究中取 $k=20\%$ ^[3]); ρ 为硼/硝酸钾密度; v 为硼/硝酸钾燃速 (由于硼/硝酸钾燃速受压强影响很小,本研究中假设燃速固定,取 $v=25\text{mm/s}$); A 为燃面面积。另外,本文只计算电爆管发火 5ms 内的点火过程,因此可以忽略药柱燃面退移造成的自由容积变化。

(3) 点火器出口在膜片打开前为无滑移绝热壁面,膜片打开 (膜片打开压强为 0.2 MPa) 后为压力出口 (常温常压)。

(4) 其他壁面均采用无滑移绝热壁面。

3.3 计算结果分析

3.3.1 点火器中心截面压强和温度分布

图 7 为点火初始阶段不同时刻点火器中心截面压强分布。由图 7 可以看出,在 0.5ms 前,原结构及优化结构药柱内外通道压差很小;从 0.6ms 开始,2 种结构内通道压强逐渐增大且分布比较接近,但原结构的外通道压强上升较慢,与内通道的压差逐渐扩大,而优化结构的外通道压强上升速率相比于原结构明显提高,缩小了与内通道的压差。

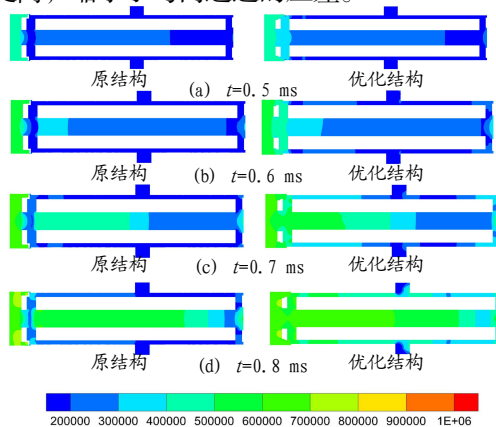


图 7 不同时刻点火器中心截面压强分布
Fig.7 Pressure distribution at the center section of ignitor at different times

图 8 为点火初始阶段不同时刻点火器中心截面温度分布。由图 8 可以看出,在 0.5 ms 时刻,药面最高温度约 600K,低于着火温度;从 0.6ms 开始,药柱头部内表面达到着火温度被点燃,燃面逐渐向后推移。原结构内燃面向后推移速度明显比外燃面更快,部分区域存在内药面已经点燃而外药面还未点燃的情况;优化结构的外燃面向后推移速率得到提升,几

乎能够与内燃面保持平行向后推移。

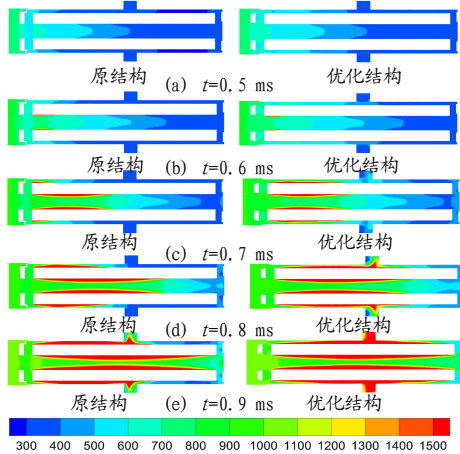


图 8 不同时刻点火器中心截面温度分布
 Fig.8 Temperature distribution at the center section of ignitor at different times

3.3.2 药柱内外通道压强及压差曲线

图 9~10 分别为 2 种结构内外通道压强及压差曲线。

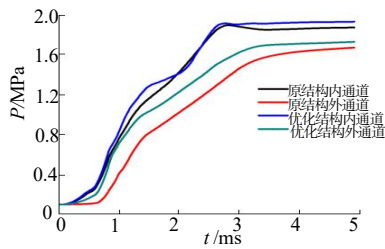


图 9 两种结构内外通道压强曲线
 Fig.9 Pressure curves of internal and external channels of the two structures

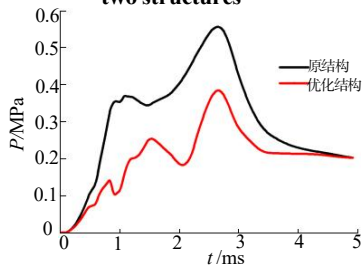


图 10 两种结构内外通道压差曲线
 Fig.10 Pressure difference curves of internal and external channels of the two structures

从图 9 可以看出，2 种结构的内通道压强曲线非常接近，在 0 至 2.8ms 左右快速升高，随后逐渐趋于稳定；但相比原结构，优化结构的外通道压强曲线整体向左偏移，即同一时刻，优化结构的外通道压强更高，从 3.5 ms 左右开始，2 种结构的外通道压强也逐渐趋于稳定。从图 10 压差曲线可以看出，2 种结构的内外通道压差存在较大波动，优化结构与原结构相比，压差整体减小，且峰值降低约三分之一。从 4.0 ms 左右开始，2 种结构的内外通道压差逐渐趋于稳定。

3.4 验证试验

根据仿真结果，优化结构的药柱内外通道压差明显降低，可以有效提高药柱在点火过程中的结构完整性，降低其断裂导致燃面增大的风险。采用改进后的挡板结构对点火器分别进行了高低常温点火试验，常温试验测压容器内的 $P-t$ 曲线如图 11 所示。

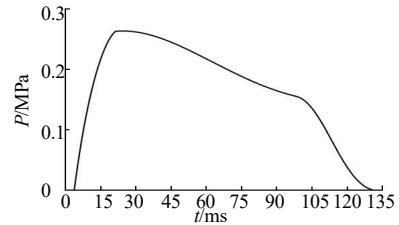


图 11 优化后点火器 $P-t$ 曲线
 Fig.11 $P-t$ curve of the optimized ignitor

由图 11 可以看到，点火器点火后 20ms 左右达到输出压强峰，约 0.27MPa，与故障件相比，压强峰明显降低，满足设计指标要求；同时，优化后压强达到峰值时间与故障件相比明显延长，分析认为是故障件的药柱断裂后燃面异常增大，压强快速上升，压强峰相比于正常情况提前达到导致的，这也与分析的故障原因相吻合。点火后检查管体结构完整，说明改进措施有效。

4 结论

- (1) 药柱挡板等结构设计对点火器内部的流场分布非常重要，应确保燃气的通畅流动，尤其应尽量减小药柱内外通道的压差以保证药柱的结构完整性。
- (2) 在点火器的设计过程中，尽可能先采取仿真手段对内流场进行计算，对比不同结构下的流场分布，确定优化结构后再进行地面试验。

参考文献：

[1] 白涛涛,张泽远,邢国强,等.带侵蚀效应的三维双燃速装药固体火箭发动机点火过程[J].航空动力学报,2018,33(5):1 256-1 262.

[2] 曹杰,周省长,鞠玉涛.自由装填药柱点火冲击载荷数值仿真研究[J].航空兵器,2012(2):25-28.

[3] 祝明水,龙新平,蒋小华,等. B/KNO₃ 燃烧性能参数计算[J].兵工学报,2005,26(3):320-322.