

doi: 10.7690/bgzd.2013.11.015

一种高压试验装置增压密封结构设计及仿真

赵威, 何永, 陶齐冈, 宋焦

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为解决某高压试验装置内膛密封问题, 根据膛内外压力差异设计了一种增压自胀式高压密封结构。利用 ABAQUS 有限元软件建立密封结构的平面轴对称模型, 仿真计算得到该密封结构在高温高压火药气体作用下的应力分布和动态变形, 根据密封面残余间隙的时间响应对该结构的密封性能进行评估, 结果表明: 在 0.38~1.02 ms 的高压时间段, 炮身与筒体之间残余间隙值为零, 密封性能良好。该密封结构满足高压试验装置的密封要求, 为解决火炮等高压设备和装置的密封技术问题提供了有效途径。

关键词: 高压试验装置; 增压自胀式密封结构; 有限元分析; 改进与优化

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Design and Simulation for Supercharged Sealing Structure of High Voltage Test Device

Zhao Wei, He Yong, Tao Qigang, Song Jiao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the bore seal problem of high voltage test device, a supercharged self-expansion sealing structure was designed based on the bore pressure difference. The axisymmetric plane model of the sealing structure was established and calculated by ABAQUS to obtain the stress distribution and dynamic deformation of the sealing structure under high temperature and pressure of powder gas, in addition, sealing performance of the structure was evaluated according to the time response of residual gap, the results showed that sealing performance of the structure is good when the barrel and cylinder residual clearance value is zero in the high period of 0.38~1.02 ms. The sealing structure can meet the requirements of high-voltage testing apparatus and offer an effective method for solving the sealing technology problem of the artillery and other high-voltage equipment.

Key words: high voltage test device; supercharged self-expansion sealing structure; finite element analysis; improvement and optimization

0 引言

火炮发射瞬间, 产生大量高温高压火药气体推动弹丸高速前进; 因此, 炮膛密封性能的好坏至关重要。火炮炮膛的密封主要通过锥形药筒或特殊的闭气结构实现。与火炮发射过程相类似, 某型高压试验装置在工作时也需要专门的密封结构来密封火药燃气。该试验装置需要频繁开闭和重复使用, 要求密封结构不能太复杂; 同时密封结构在短时间内将承受高温高压火药燃气的冲击, 工作环境特殊, 又要求密封结构简单可靠^[1]。

火炮药筒密封结构简单, 操作迅速, 但是在高压气体作用下会产生塑性变形, 导致抽筒困难, 而且不能重复使用; 闭气结构寿命长, 可靠性好, 但是结构复杂, 对于构件的刚强度和工艺性要求高, 部分结构还需要与非金属材料配合使用, 防蠕变、抗高温能力差^[2]。由此可见, 仅仅依靠单独的药筒或者闭气结构来密封高温高压火药燃气远远不能满足高压试验装置的密封要求。

笔者汲取火炮炮膛密封的优势, 针对某高压试验装置的特殊性, 设计了一种增压自胀式高压密封结构, 利用 ABAQUS 仿真软件对其工作过程进行数值计算, 通过密封面残余间隙大小来评估密封性能。同时提出了若干改进密封性能的途径, 为该密封结构的工程应用提供了一定的参考依据。

1 密封结构原理

密封结构如图 1 所示, 主要由筒体、压盖和导向增压杆构成。增压杆杆端与大气连通, 压盖前端与弹体接触, 另一端与筒体锥面配合, 利用锥面自动找正增强密封效果。接触面涂抹适量炮油, 润滑的同时能够密封低温低压阶段的火药气体。该密封结构可以承受瞬时高温高压火药气体的冲击, 不产生塑性变形, 方便抽筒, 且能够多次重复使用。

如图 2 所示, 高压试验装置工作时, 火药气体充满药室, 增压杆两端存在压力差。在火药气体作用下增压杆带动压盖挤压筒体锥面, 筒体锥面处产生径向膨胀变形, 与炮身内壁形成可靠密封, 如图

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2013-07-08

作者简介: 赵威(1987—), 男, 湖北人, 工学硕士, 从事火炮结构设计研究。

3 所示。火药气体压力越大，筒体径向变形越大，与炮身挤压越紧，密封效果越好。当火药气体压力下降时，筒体产生的膨胀变形逐渐消失，直至与炮身分离，恢复初始状态。

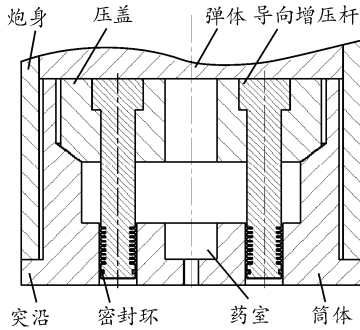


图 1 密封结构工作原理

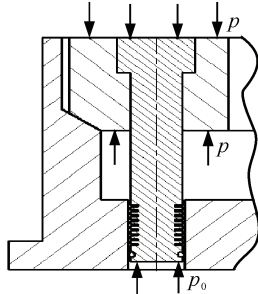


图 2 密封结构增压原理

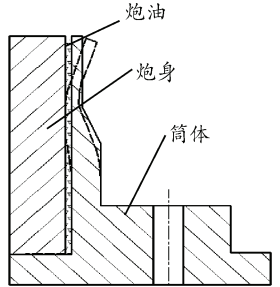


图 3 关键密封构件工作示意图

增压杆与筒体构成的迷宫式辅助密封结构，能够有效阻止增压杆轴向移动过程中的气体泄漏，保证整个密封系统的可靠密封，如图 4 所示。

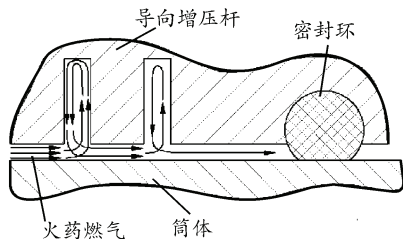


图 4 辅助密封工作示意图

2 密封结构仿真分析

利用计算机进行辅助设计和仿真分析，可以使人们在以往最基础材料结构连续性假设的前提下，对于工程结构所反映出的各种力学性能有更准确地

把握，能够方便地了解结构性能并在短时间内进行方案修改和优化，大大降低成本。

笔者采用非线性有限元软件 ABAQUS 对增压密封主体结构进行仿真研究，根据仿真结果分析密封结构的性能。

2.1 密封结构模型的建立与仿真

根据密封结构的特点，在建模时对结构作如下简化和假设：

- 1) 密封构件周向受力均匀，压盖、筒体与炮身轴线重合；
- 2) 密封主体构件承受轴对称载荷，仿真计算时，按轴对称问题建模，将三维问题转化为平面问题，减小模型规模，缩短计算时间^[3]；
- 3) 辅助密封结构能够实现可靠密封，导向增压杆与筒体的相互作用忽略不计；
- 4) 火药气体对筒体的作用力简化为作用在筒体锥面的面载荷；
- 5) 对密封结构某些细节和非关键部位进行简化。

经过简化，密封结构轴对称仿真模型包含炮身和筒体 2 部分，建模时将炮身与筒体间初始间隙设置为 0.05 mm，材料均为炮钢^[4]。考虑到炮身与筒体接触面光洁度较高，且工作时受动载荷作用，模型中库仑摩擦系数设为 0.1，在炮身内侧与筒体外侧配合面定义接触对，采用 CAX4R 单元进行网格划分，并对筒体局部网格进行细化，如图 5 所示。

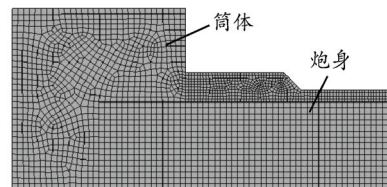


图 5 密封结构有限元模型

高压试验装置工作时火药燃烧持续时间极短，且膛内压力大小随时间变化。笔者将工作中的动态膛压作为压力载荷，运用 ABAQUS 显式动态分析模块计算密封结构在火药气体作用下的非线性响应^[5]。

如图 2 所示，增压杆受火药气体压力 p 和大气压力 p_0 共同作用，但 p_0 相对于 p 的影响可以忽略，同时将相反方向的压力投影抵消掉， p 的有效作用面积即为增压杆的截面积大小。筒体锥面压力载荷与火药气体压力关系^[6-7]如下：

$$p' = \frac{N \cdot p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_z^2 / \sin \alpha}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) / \sin \alpha} = \frac{N \cdot D_z^2}{(D_1^2 - D_2^2)} \cdot p$$

式中： p' 为作用于筒体锥面的压力载荷； α 为锥面与垂直方向的夹角； N 为导向增压杆的数量； D_z 为

导向增压杆的直径； D_1 、 D_2 分别为筒体锥面的外、内圆直径。

由上式可知，筒体锥面所受到的压力载荷随火药气体压力增大而增大。经过仿真分析，该密封结构工作时的应力分布结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，在膛压最大时刻，炮身已经与筒体接触，而且接触部位由于筒体锥部的挤压变形，产生了较大的应力分布。

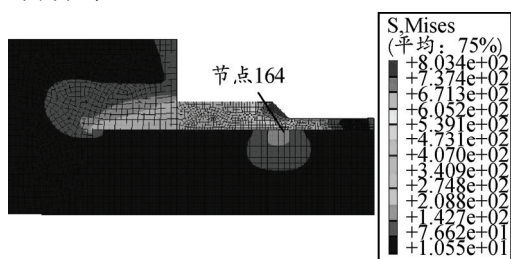


图 6 膛压最大时应力云图(单位: MPa)

2.2 有限元计算结果分析

图 7 是高压试验装置工作压力和筒体外壁编号为 164 节点径向位移随时间变化曲线。从图 7 中不难看出，筒体径向位移随着火药气体压力变化而变化，在膛压最大时刻径向位移达到最大值 0.062 mm，大于筒体与炮身的初始间隙 0.05 mm。

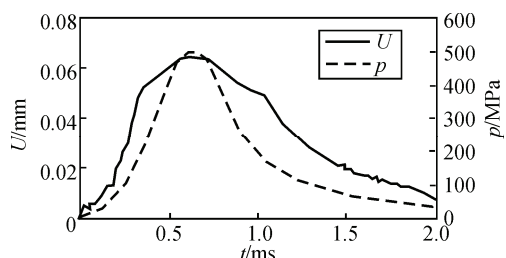


图 7 164 号节点径向位移和膛内压力随时间变化曲线

图 8 是炮身与筒体接触面积大小随时间变化曲线。由图 8 可见，当火药开始燃烧时，膛内压力并不是很高，筒体与炮身没有接触，接触面积大小为零。随着火药气体压力进一步增大，筒体径向位移大于初始间隙，开始与炮身接触，接触面积逐渐增大，在 0.4~0.8 ms 的短暂 0.4 ms 内，筒体与炮身的接触面积达到最大值。当火药气体压力下降时，筒体在自身刚度作用下开始逐渐回复初始状态，接触面积减小，最终筒体与炮身分离。图 7 和图 8 的曲线在理论上符合筒体的变形过程，说明密封结构的设计机理是正确的。

笔者采用筒体外圆柱面与炮身内壁之间的平均动态间隙(残余间隙)来评价密封结构的密封性能^[8]。根据配合初始间隙值以及仿真计算得到的筒

体、炮身径向动态位移，得到平均残余间隙随时间变化曲线如图 9 所示。

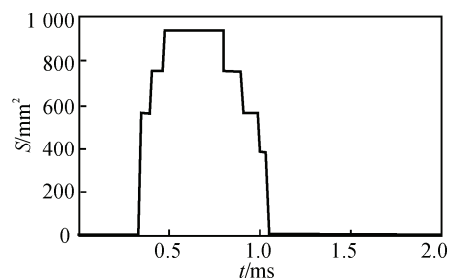


图 8 炮身与筒体接触面积随时间变化曲线

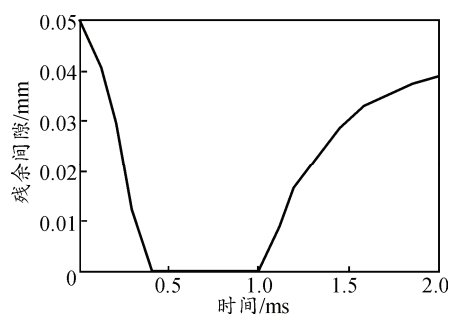


图 9 残余间隙随时间变化曲线

图 9 直观地揭示了火药气体作用时期残余间隙随时间变化规律，可作为判定密封性能的特性曲线。试验装置关键是保证工作过程中高压阶段的密封，为了较好地实现火药气体的密封，图 9 中所示的“谷底”段必须尽可能既低又宽^[8]。理想情况下，密封结构可靠密封时，残余间隙的值等于零，同时实现密封的时间点尽可能早，且持续时间足够长。从图 9 可以看出，在 0.38~1.02 ms 的高压时间段，炮身与筒体之间残余间隙值为零，表明该密封结构能够实现高压火药气体的可靠密封。

3 密封性能改进优化途径探讨

仿真计算结果表明，笔者提出的密封结构能满足高压试验装置的工作要求。然而该密封结构包含多个构件，构件的几何参数和相互之间的接触、摩擦行为都会影响该密封结构的密封性能，因此必须对密封结构进行优化改进，以便实现最优密封性能。

改善该结构密封性能的总体思路是，在保证各构件强度的前提下，减小工作时筒体与炮身间的残余间隙。主要包括 4 个途径：

- 1) 增大压差，提高火药气体作用效能，可以从增压杆数量、直径和筒体锥角的选择方面考虑；
- 2) 在初始间隙大小不变的情况下，筒体采用弹性模量小的材料，提高柔性，增加径向变形量；