

文章编号: 1003-1480 (2008) 03-0001-03

发射动力系统主装药温度变化规律研究

都军民, 张宇

(中船重工第713研究所, 河南 郑州, 450015)

摘 要: 采用数值计算方法对发射动力系统主装药随环境温度的变化规律进行了研究, 分析了接触热阻和自然对流对计算模型的影响, 并与试验结果进行了对比分析。结果表明: 当动力系统置于温差 20 的环境中时, 经过 5h 传热, 主装药与环境温度相差约 9%, 而经过 10h 传热后, 主装药与环境温度相差不到 0.5%。该研究结论为分析环境温度对发射动力系统内弹道的影响提供了依据。

关键词: 燃气发生器; 瞬态传热; 接触热阻; 内弹道

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A

Study on the Temperature Varying Laws of Propellant of the Launch Power System

DU Jun-min, ZHANG Yu

(The 713 Research Institute, CSIC, Zhengzhou, 450015)

Abstract: The research is carried out on the temperature varying laws of main propellant of launch power system by using numerical calculating methods, the effect of contact heat resistance and natural convection on computing model is analyzed, and the comparative analysis is made with test results. It shows that when the launch power system is in the environment of 20°C temperature difference, the temperature difference between main charge and environment is about 9% after 5 hours heat transfer, while after 10 hours heat transfer, the temperature difference isn't reach up to 0.5%. The research conclusion provides dependence for the analysis of the environmental temperature effecting on the inner trajectory of launch power system.

Key words: Gas generator; Instantaneous heat conduction; Heat resistance; Interior ballistic

发射动力系统是冷发射导弹武器系统的重要组成部分, 其功能是提供导弹在发射筒内运动的作用力, 为导弹可靠点火和飞向目标提供必要的初始内弹道。其中燃气发生器又是整个发射动力系统的核心, 是产生燃气的动力源, 因此燃气发生器中主装药的工作性能直接影响到动力系统内弹道指标的实现。研究表明影响主装药性能最重要的因素是温度的变化, 开展燃气发生器主装药温度随环境变化的规律研究, 对于深入分析动力系统内弹道指标的变化具有重要意义。

1 主装药温度随环境变化规律的数值计算

1.1 计算模型

当燃气发生器放置在与初始温度不同的环境中时, 是一个被加热或被冷却的过程, 在达到平衡之前, 燃气发生器内部的温度场以及壳体与周围的空气进行热交换的能力、大小和状况随时间而变化。因此求解燃气发生器主装药温度变化规律是一个典型的瞬

收稿日期: 2008-04-29

作者简介: 都军民 (1972-), 男, 研究员, 主要从事 CAD/CAB 研究、可靠性等工作。

态温度场的求解问题。

瞬态热平衡可以表示为^[1]：

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

式(1)中： $[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数和形状系数； $[C]$ 为比热矩阵，考虑系统内能的增加； $\{T\}$ 为节点温度向量； $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数； $\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

将燃气发生器内各个部件之间的传热均视为导热问题来处理。在笛卡尔坐标系中，非稳态导热微分方程的一般形式为^[1]：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (2)$$

式(2)中： ρ 、 c 、 λ 分别为各部件的密度、比热容和热传导率； $\dot{\Phi}$ 为单位时间内单位体积内热源的生成热； τ 为时间。

在自然放置状态下，导热系数为常数，且无内热源，则式(2)可简化为^[1]：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式(3)中： $\alpha = \lambda / (\rho c)$ ，称为热扩散率。

式(3)是燃气发生器各个部件的导热微分方程的一般形式，求解燃气发生器主装药温度变化规律，实质就是对上述导热微分方程的求解。而求解该微分方程需要两个条件：即初始时刻温度分布的初始条件，以及导热物体边界上温度或换热情况的边界条件。燃气发生器导热问题的边界条件为第三类边界条件，即与壳体外表面相接触的流体介质的温度和换热系数为已知，用公式表示为：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_f) \quad (4)$$

式(4)中： T_f 为与壳体外表面相接触的流体介质的温度； k 为热传导系数； h 为壳体的表面换热系数； n 为方向向量。

1.2 计算假设

利用数值计算方法分析燃气发生器主装药温度变化规律时，做以下假设：(1)燃气发生器为轴对称结构，从各个方向传热时均匀一致；(2)燃气发生器内腔空气、主装药为各向同性，且导热系数为定值；(3)燃气发生器内腔空气简化为热传导；(4)

燃气发生器各连接面的接触热阻可以忽略。

将燃气发生器内腔空气、主装药的导热系数假设为定值，是因为计算中温度的变化范围较小，导热系数变化也相应较小，简化为定值不会对结果产生较大影响。

燃气发生器内腔是一个封闭的空间，其中的空气属于有限空间的自然对流。但由于内腔温度变化十分缓慢（初步估算主装药温度变化20℃约需10h；在温度变化过程中，主装药和燃气发生器壳体内壁温差不超过15℃），因此可将燃气发生器内腔空气的传热方式简化为热传导。但为了提高计算的准确性，可引入当量热导率的概念进行修正：即利用有限空间气体自然对流当量热导率准则关联式求出内腔空气的当量热导率，并以此当量热导率来计算空气的传热特性。

将燃气发生器内腔简化为竖直夹层结构，经初步计算分析，选用以下公式^[2]：

$$\lambda_e = 0.197 (Gr Pr)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\delta}{H} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (5)$$

式(5)中： λ_e 为内腔空气的当量热导率； Gr 为格拉晓夫数； Pr 为普朗特数； δ 为竖直夹层的厚度， H 为竖直夹层的高度。

$$\text{其中：} \quad Gr = \frac{g a_v \Delta T \delta^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (6)$$

式(6)中： a_v 为空气体积膨胀系数； g 为重力加速度； ΔT 为两个壁面的温差； ρ 为空气的密度； μ 为空气粘度。

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (7)$$

式(7)中： c_p 为空气比热容， λ 为空气热传导率。利用上述公式，可求出燃气发生器内空气当量热导率，当量热导率在一定程度上考虑了对流换热的影响，从而使计算结果更接近于工程实际。

燃气发生器壳体由若干个零部件组合而成。零部件间的结合面在宏观上是完全接触的，但实际上由于结合面表面的微观不平，两接触面只是在某些微凸峰处互相接触并产生变形，其它矮的凸峰和凹谷处则存在空隙^[3]。由于空隙中媒质（如空气）的导热系数一般较接触面金属材料的小，因此在结合面处就会对热流产生阻力，即接触热阻。接触热阻受零件材料、接触面压力、粗糙度、润滑状况及介质类型等多种因素

的综合影响。一般情况下,若接触面的法线方向和热流方向一致,则接触热阻的影响是不能被忽视的。但由于本研究中的燃气发生器壳体结合面法线方向与热流方向相互垂直,因此接触热阻对计算结果的影响较小,可以忽略。

1.3 传热模型的建立及计算

燃气发生器壳体选用 solid87 四面体单元,主装药选用 solid90 六面体单元进行网格划分,按表 1 施加燃气发生器各部件的主要物性参数。

表 1 材料热性能参数表

Tab. 1 Material thermal property parameters			
部件	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数 /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	比热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)
壳体	7 800	43.2	470
药柱	1 684	0.31	1 260
空气	1.29	0.045 9(当量热导率)	1 005

定义初始条件:燃气发生器初始温度为等温 0,环境温度为恒温 20。在燃气发生器外表面施加对流传载荷,对流系数为 $110\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。设置计算终止时间为 36 000s,时间步长为 300s。计算得到燃气发生器各个节点温度随时间的变化关系,如图 1~2 所示。

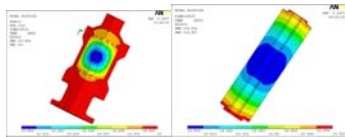


图 1 10h 温度云图

Fig.1 Temperature distribution after 10 hours

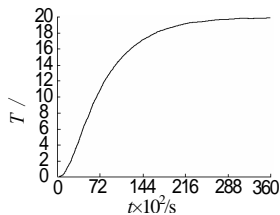


图 2 主装药温度随时间变化计算曲线

Fig.2 Temperature varying curve of main propellant center

计算结果表明:经过 5h 的传热后,燃气发生器外壳的温度已达 19.996,中心药柱内部的最低温度为 18.198,与环境温度相差 9%;而经过 10h 传热后,壳体已近似等于 20,中心药柱内部的最低温度为 19.915,与环境温度相差不到 0.5%。

2 试验验证

采用与计算模型相同参数的燃气发生器开展相应的试验,进一步研究装药温度随环境的变化规律。

将燃气发生器装入高低温箱内,通过调节高低温箱内的温度来模拟燃气发生器环境温度的变化。在燃气发生器壳体内壁、药柱内外壁粘贴热电偶式温度传感器,通过数据采集设备记录燃气发生器上各点的温度变化。试验中,首先将燃气发生器置于 0 的高低温箱中保温 10h,使其温度均匀地降至 0,然后再将其置于 20 的保温箱中保温 10h,实时记录测点的温度值,并画出温度—时间曲线图,并与计算曲线进行对比,如图 3 所示。

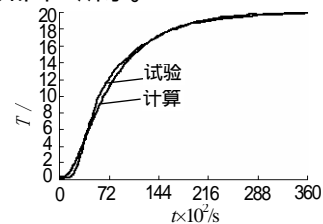


图 3 主装药温度试验与计算曲线对比

Fig.3 Comparison of experiment and calculation curve of main propellant center temperature

从图 3 可以看出,计算结果与试验结果总体吻合较好,绝对误差为 $-0.96 \sim 0.68$ 。在 3~4h 之前,试验与计算结果存在一定差距,而随着时间延长,计算结果与试验数据趋向一致。

3 结束语

本文利用数值计算和试验相结合的方法对发射动力系统主装药温度随环境的变化规律进行了研究。研究表明当动力系统置于温差 20 的环境中时,经过 5h 传热,主装药与环境温度相差约 9%,而经过 10h 传热后,主装药温度与环境温度基本一致,该结论为进一步开展环境温度对动力系统内弹道的影响分析提供了有利依据。

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
- [2] 魏龙. 热工与流体力学基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [3] 沈军,马骏,刘伟强. 一种接触热阻的数值计算方法[J]. 上海航天, 2002(4): 33-36.