仿真技术在弹药贮存中的应用

宣卫芳^{1,2}, 张勇智^{1,2}, 王一临^{1,2}

(1.中国兵器工业第五九研究所,重庆 400039;2.重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心,重庆 400039)

摘要:利用仿真技术测定弹药贮存的微环境,根据包装结构和弹药结构对弹药贮存的微环境进行了分析。采用较为简便的数学模型,找出了包装箱和弹药在变化的环境温度下的温度分布和变化规律,然后通 过弹药贮存微环境的仿真设计,确定了计算软件的功能模块。使用该软件可计算任一时间弹药及其各包装 部位微环境的温度。

关键词: 仿真技术; 弹药; 贮存; 微环境 中图分类号: TJ410.89; O242.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2011)06-0010-05

Application of Simulation Technique in Ammunition Storage

XUAN Wei-fang^{1,2}, ZHANG Yong-zhi^{1,2}, WANG Yi-lin^{1,2}

(1. No.59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;2. Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

Abstract: Simulation technique was used for measuring micro–environment of ammunition storage. The micro–environment was analyzed based of configuration of ammunition and its packaging. The temperature distribution and changing rule of ammunition and its packaging under different environment temperature was found out by simple and convenient math model. Simulation design of the micro–environment was carried out and the function module of calculation software was determined. The temperature in each positions of ammunition and its packaging can be calculated every time by the software.

Key words: simulation technique; ammunition; storage; micro-environment

弹药是一次使用、长期贮存的产品,贮存环境的 好坏直接影响到弹药的战技性能。在自然环境中, 贮存库的环境温度可以通过检测获得,但弹药包装 箱内微环境的温度分布和变化规律无法用一般的方 法获取,可以利用仿真技术了解包装箱中弹药内推 进剂温度随环境温度的变化规律^[1]。

1 包装结构及储存微环境分析

某弹药在包装箱内的储存状态如图1所示。包装 箱是外径为170 mm的玻璃钢圆筒,箱体壁厚为3 mm, 包装箱内壁与弹药圆柱体外壁间的空气间隙为6 mm,

收稿日期:2011-01-17

作者简介:宣卫芳(1957一),女,浙江绍兴人,研究员级高级工程师,主要研究方向为装备环境工程。

空气间隙对传热过程具有重要影响。包装箱两端用 成型的隔热缓冲材料固定,因此两端的传热对弹体温 度的影响比较小。弹丸外径为152 mm,长度为890 mm(包括弹头锥部和弹尾的长度),弹丸圆柱部分钢 壳的厚度为15 mm。弹丸圆柱部分内部是内孔直径 为20 mm、外径为120 mm、长为200 mm的圆柱状推进 剂,推进剂外表面覆盖了1 mm厚的包覆层。



图 1 弹药及包装箱结构示意 Fig. 1 The sketch map of ammunition and its packaging

包装的弹药存放于温度变化的环境中,所有的 空隙被空气所填充。当环境与包装箱之间存在温差 时,包装箱外壁与环境空气间发生热对流改变包装 箱外壁的温度,并通过热传导改变包装箱内壁的温 度。在温度梯度的作用下,热量依次从外向内或从 内向外传递,引起推进剂的温度场发生变化。

由于包装箱内壁与弹药外壁之间存在着空气间 隙,因此包装箱内壁与弹壳外壁之间的热交换包括 空气的热传导和热对流,同时存在包装箱内壁与弹 药外壁之间的辐射换热。这个有限空间内的热对 流,对箱体和弹药之间的热交换有很大的影响,当箱 体和弹药之间温差较大、间隙内形成湍流作用时更 是如此。推进剂中心孔壁与中心孔内的空气柱同样 进行热传导和热对流。综上所述,这是一个带空气 夹层、多层壁面并具有内孔的第三类边界条件下的 二维轴对称非稳态传热问题。精确求解需要运用 Navier-Stokes方程,求解空气夹层内黏性流体的温 度场,这是一个复杂的二维柱坐标下的非稳态传热 过程。考虑到弹药长度远远大于直径,两端的传热 效应较弱,可以看作一维问题来进行处理。

2 模型

2.1 物理模型

物理模型遵循下面的假设。

 1)热传导过程是一维的,仅存在径向传热,同 一半径处各周向点的温度相同。在包装箱和弹体长 径比足够大或者包装箱两端绝热性良好、端部传热 效应足够小的条件下,这个假设合理。

2)包装箱处于大空间外界环境中,外壁与环境 间仅存在自然热对流。

3)包装箱内的空间绝对密闭,即包装箱内部的 空气与包装箱外部的环境空气之间无直接热交换。

4)包装箱内壁与弹壳外壁间,用等效导热系数 表示间隙间空气的对流和导热以及壁面间辐射引起 的综合效应。这样可以不考虑间隙间空气的流动。

5) 推进剂内孔的空气柱与推进剂间已自然热 对流,该空气柱与外界无质量交换。

6)包装箱和弹体在温度变化条件下,不发生化学反应,无内热源。

2.2 数学模型

根据以上基本假设,可以导出描述包装箱和弹体的一维非稳态径向导热过程的数学模型^[2-3]。其基本控制方程可以写为:

$$\rho c \, \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \, \frac{\partial}{\partial r} \Big(r k \, \frac{\partial T}{\partial r} \Big) \tag{1}$$

式中:*T*为热力学温度;*t*为时间;*r*为径向坐标; ρ,*c*,*k*分别为材料的密度、比热容和导热系数。将 式(1)左边展开,可以得到:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$$
(2)

式中: α 为导温系数, $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ 。式(1)求定解

的条件包括初始条件和边界条件。

初始条件为:
$$T(t,r)|_{t=0}=T(0,r)$$
 (3)
边界条件为:

$$r = R_{i} \exists t, q_{i} = k \frac{\partial T}{\partial t_{wi}} = \alpha_{i} [T_{wi}(t) - T_{fi}(t)] \quad (4)$$

$$r = R_{o} \mathbb{B}^{\dagger}, q_{o} = -k \frac{\partial T}{\partial t_{wo}} = \alpha_{o} [T_{wo}(t) - T_{fo}(t)]$$

(5)

式中:R_i, R_o分别为推进剂内部空气柱的半径 和包装箱的外径; T_{wi}(t)为推进剂内孔表面温度; T_{wo}(t)为包装箱外表面温度; T_i(t)和T_i(t)分别为推 进剂内孔空气柱温度和外界环境温度; α_i和 α_o为对

3 仿真计算方法

将整个包装箱及其内容物圆柱体沿径向N等分,采用内节点法,则可将其划分为N个同心微元环,如图2所示。在每一个微元环上利用泰勒展开 式将式(5)离散化,则可得到差分方程。若采用显式 差分格式,即将时间导数向前差分近似,空间导数按 当前时刻的温度进行差分近似,略去高阶小项得到:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta \tau} \tag{6}$$



图 2 差分网格示意 Fig. 2 The sketch map of differential reseau

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{j+1}^n - T_{j-1}^n}{2\Delta\tau} \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{j+1}^n + T_{j-1}^n - 2T_j^n}{(\Delta r)^2}$$
(8)

式中: n为时间坐标; j为空间坐标; $\Delta \tau$ 为时间 步长; Δr 为空间步长。代入式(5)中得到;

$$T_{j}^{n+1} = \left[1 - \frac{2\alpha\Delta\tau}{(\Delta r)^{2}}\right]T_{j}^{n} + \frac{\alpha\Delta\tau}{\Delta r}\left(\frac{1}{2r} + \frac{1}{\Delta r}\right)T_{j+1}^{n} - \frac{\alpha\Delta\tau}{\Delta r}\left(\frac{1}{2r} - \frac{1}{\Delta r}\right)T_{j-1}^{n}$$
(9)

根据式(9)结合初始条件和边界条件,可以依次 求出下一时刻任一节点的温度,其缺点是如果 $\frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta r)^2}$ 取值不当,则差分的舍入误差会导致解的发 散。为避免这种问题,采用隐式差分格式来计算,即 空间导数的差分所涉及到的温度全部按n+1时刻的 值来计算。此时,可以得到:

$$\left[\frac{\alpha\Delta\tau}{2r\Delta r}+\frac{\alpha\Delta\tau}{\left(\Delta r\right)^2}\right]T_{j+1}^{n+1} - \left[1+\frac{2\alpha\Delta\tau}{\left(\Delta r\right)^2}\right]T_j^{n+1} + \\$$

$$\left[\frac{\alpha\Delta\tau}{\left(\Delta r\right)^{2}} - \frac{\alpha\Delta\tau}{2r\Delta r}\right]T_{j-1}^{n+1} + T_{j}^{n} = 0$$
(10)

式(10)包含 n+1时刻 3 个节点上的未知温度 $T_{j-1}^{n+1}, T_{j}^{n+1}, T_{j+1}^{n+1}$ 和一个已知节点上的温度,无法直接 求解,必须在列出所有节点的方程后,根据相应的边 界条件求解线性代数方程组,从而确定 n+1时刻每 一个节点上的温度。该完全隐式的差分格式对任意 $\frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta r)^2}$ 都是稳定的,计算结果受时间步长 $\Delta \tau$ 和空 间步长 Δr 的影响。

对于边界上的节点,由于是第三类边界条件,考 虑边界元的热容,并采用隐式差分格式将式(3),(4) 进行离散化处理,分别可以得到:

$$k \frac{T_2^{n+1} - T_0^{n+1}}{\Delta r} = \alpha_i (T_0^{n+1} - T_{fi}) + \frac{\rho c \Delta r (T_0^{n+1} - T_0^n)}{\Delta \tau}$$
(11)

$$-k \frac{T_{N}^{n+1} - T_{N-1}^{n+1}}{\Delta r} = \alpha_{o} (T_{N}^{n+1} - T_{fo}) + \frac{\rho c \Delta r (T_{N}^{n+1} - T_{N}^{n})}{\Delta \tau}$$
(12)

式中:0为内边界节点;N为外边界节点。

在建立起温度场内每一节点的离散化方程后, 对于上述一维非稳态问题,可以采用三对角阵算法 (TDMA)求解方程组^[4]。在已知上一时刻各节点的温 度和边界条件下,可以依次得到下一时刻各节点的 温度值。

需要注意的是由于计算对象是一个非均匀物性 材料的复合传热体,在划分网格时尽量避免1个节 点包含2种物性材料。原则上,网格的尺寸不受限 制,但每种材料至少要包含2个以上的网格。2种材 料交界面上的参量采用体积平均法处理,包装箱和 弹壳之间的空气间隙采用等效的导热系数表示封闭 空间内空气的对流换热和导热。计算时间步长可任 取,但是在温度变化比较剧烈时,过分大的时间步长 会引起比较大的计算误差。

4 计算软件功能模块

计算软件以 Microsoft Visual C++为开发环境,开 发出的基于对话框的 MFC应用程序^[5]。系统功能包 括"导入计算参数"、"基本结构参数"、"材料物理参 数"、"外界环境条件"、"设定计算条件"、"保存计算 参数"、"开始计算"和"退出系统"8个部分,如图3所示。

导入计算参数	基本结构参数
设定计算条件	材料物理参数
保存计算参数	外界环境条件
开始计算	退出系统



 1)"导入计算参数"模块。"导入计算参数"功能 模块是将预先设置好的对象结构参数、物性参数、环 境条件参数和计算条件参数在参数系统中进行计 算,也可以不导入计算参数而直接对对象的各参数 进行编辑。

2)"基本结构参数"模块。"基本结构参数"用于 输入发动机及包装箱的基本参数,包括中心孔半径、 药柱厚度、包覆层厚度、发动机壳体厚度、包装箱空 气间隙厚度和包装箱厚度,如图4所示。

发动机及包装箱的基	本参数(m
中心孔半径。	19835
药柱厚度:	0.00
包覆层厚度,	6,000
发动机壳体厚度;	15,022
包装箱空气间围厚度。	10.306
包装箱厚度。	6, 600
(NI)	TH

图4"基本结构参数"界面

Fig. 4 The interface of basic configuration parameter

3)"设定计算条件"模块。该功能可以修改计算 空间步长和时间步长,并选择采样点频率。根据边界 变化函数不同,时间采样点可选择:1点/h,2点/h,3点/ h,4点/h,或者1点/d,2点/d,3点/d,4点/d,如图5所示。

4)"材料物理参数"模块。通过"材料物理参数" 功能模块可以输入或编辑材料的导热系数、密度、比 热容。各参数均采用国际标准单位,如图6所示。

5)"外界环境条件"模块。该功能模块用于设定 环境温度,环境变化函数包括正弦函数和梯形函数。



图5"设定计算条件"界面

Fig. 5 The interface of setting computation condition

材	材料的热物性参数			
	导热系数	密度	比热度	
(1) 推进制:	-	-	-	
(2)包覆层:	-	And Int.	-	
(3) 弹壳:	(Here)	14461213		
(4)包装箱:	(100)	1000	-	

图6 "材料物理参数"输入界面

Fig. 6 The inputting interface of material physical parameter

当选择"正弦函数"时,如图7所示,"环境平均温度" 指的是T₀,"环境波动温度"指的是T๓,温度上升和下 降时间不可选;若选择"梯形函数",界面如图8所示, 可以给出梯形函数的最高温度和最低温度,可以对温 度上升、保持和下降时间进行设置,其中温度必须在 20~50℃之间,若设置温度超过此范围,则弹出提示 消息框。值得注意的是:如果改变温度变化周期,需 要同时改变温度上升、保持和下降时间,使其总和等 于1个周期的时间。



图7"正弦函数"初始条件和"边界条件"设置界面

Fig. 7 The interface of setting original condition and border condition of sine function

全弹初始温度	
初温保持时间(h)	
匀速升器时间(4)	
高温保持时间(16)	. 18
勾速降温时间(h)	*
	全弹初始温度 初晶保持时间(h) 匀速升温时间(h) 高温保持时间(h) 匀速降温时间(h)

图8 "梯形函数初始条件"和"边界条件"设置界面

Fig. 8 The interface of setting original condition and border condition of trapezia function

6)"保存计算参数"模块。将设定好的各项计 算参数保存在文本文件中。

7)"开始计算"模块。设定好计算参数后开始 计算各点温度,计算结果保存在 Microsoft Office Excel工作簿文件中,如图9所示。

								1.11
		11000		10.050	10 - 11 II.		1.000	
	-Malor	推进的内藏	推进利用板	物製品力量	爆炸的槽	包括新行機	1928	
	0.6	20.8	23.0	20.8	28.0	28.8	20.0	
	100	25.8	. 20.0	- 20.8	20.0	10.4	20.0	
	1.5	25.4	29.0	20.6	20.0	25.1	20.0	10 million
	3.0	28.8	29.0	.20.0	20.0	28.8	20.0	1. Contract (1. Contract)
	2.6	20.8	20.0	20.0	20.1	12.1	28.0	1
	0.0	20.4	30.0	- 20.3	20.4	22.4	20.0	
	3.6	21.4	- 29.0	1 BAL 8 1	21.0	36.1	36.0	
	4.0	25.4	22.1	21.2	. 21.0	28.4	40.0	
	4.5	26.1	20,2	22.1	. 22, 8	26.4	40.0	
	0.0	20.2		312.5	25/3	36.6	40.0	
	-6.5	25.4	11.9	23.6	- 24.4	58.7	-40,0	
	6.0	25.6	11.4	24.3	25.1	36.1	40.0	
	6.6	28.8	TL 9	24.8	1.2817	10.8	40.9	
	T.0	10.5	72.0	25.4	26.5	125.1	-40.9	
	3.8	22.4	22.8	26.8	26.8	37.1	40.0	
	8,0	25.1	- 23.2	26.6	25.3	20.2	#0.0	
	3.8	10.5	25.7	20.1	21.8		40.0	
	9.8	22.18	14.1	325.4	26.2	32.4	#4.0.1	
	3.6	21.4	34.6	21.4	26.1	52.8	40.0	
1	23.0	23.8	25.0	21,2	29.4	2.1	-40.0	
ĺ	10.5	0.1	15.5	35.1	- 22.4	(思):	40.0	
	16.0	24.T	35.2	25.7	21.5	.H.T.	40.0	
	11.5	25.1	38.3	20.4	25.1	22.1	.40, 0	
	12-0	25.5	- 26.7	25.8	-90.8	62.8	40.0	

图9 各部位温度计算结果

Fig. 9 The calculation result of temperature of each positions

8)"退出系统"模块。此模块用于退出该系统。

5 结语

使用该软件可计算任一时间弹药及其包装各部 位的微环境的温度,从而找出包装箱和弹药在变化的 环境温度下的温度分布和变化规律。仿真设计所确 定计算软件功能模块适用于弹药、导弹及其他武器在 包装状态贮存时各部位的微环境温度的研究,以指导 产品和包装的设计,提高产品的环境适应性。

参考文献:

- [1] 朱蕾,王连杰,许明,等.装备环境适应性仿真技术的发展思路探讨[J].装备环境工程,2007,4(3):91-97.
- [2] 康凤举,杨惠珍,高立娥,等.现代仿真技术与应用[M].北 京:国防工业出版社,2006.
- [3] 郭齐胜,杨秀月,王杏林,等.系统建模[M].北京:国防工 业出版社,2006.
- [4] 纳卡马勒.科学计算引论——基于MATLAB的数值分析[M].梁恒,刘晓艳,译.北京:电子工业出版社,2002.
- [5] 何江华,郭果敢. 计算机仿真与军事应用[M]. 北京:国防 工业出版社,2006.

(上接第5页)

法研究并不多见,笔者设计了后方军械仓库电磁防 护能力评估的指标体系,并运用模糊综合评判法对 后方军械仓库的电磁防护能力进行了计算评估。结 果表明这种方法简便可行,对后方军械仓库的电磁 防护能力评估具有一定的参考价值,对其它场所的 电磁防护评估也有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 刘尚合.武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J].装 备指挥技术学院学报,2005,16(1):1-6.
- [2] 李江涛,徐锦,徐世录.美国高功率微波弹药[J]. 舰船电 子工程,2006,15(5):32—35.
- [3] 谭跃进,陈英武,易进先.系统工程原理[M].长沙:国防科 技大学出版社,1999.