

1-2-2019

Numerical Simulation of Moisture Diffusion of Composite Solid Propellant

Yufeng Wang

Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

Gaochun Li

Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

Xudong Zhang

Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

Qu Kai

Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Moisture Diffusion of Composite Solid Propellant

Abstract

Abstract: In order to elucidate the humidity aging mechanism of composite solid propellant, the diffusion and the distribution of moisture inside the composite solid propellant under humidity was evaluated through *the hygroscopic test of propellant. The mathematical and the FE model of moisture diffusion were proposed. The FEM was employed to simulate the moisture diffusion inside propellant. Moreover, the factors that affect the moisture diffusion were analyzed.* The results showed that the humidity FEM can be used to simulate the hygroscopic process inside propellant. The temperature can affect the moisture diffusion. The higher the temperature is, the greater the coefficient and the diffusion speed of moisture are. Furthermore, the dimension of propellant specimen can also affect the moisture diffusion. That is, the diffusion speed of moisture becomes smaller with increasing the dimension of propellant specimen, and then the time to reach equilibrium becomes longer.

Keywords

composite solid propellant, moisture diffusion, finite element method, relative humidity, moisture distribution

Authors

Yufeng Wang, Gaochun Li, Xudong Zhang, Qu Kai, and Jinfei Li

Recommended Citation

Wang Yufeng, Li Gaochun, Zhang Xudong, Qu Kai, Li Jinfei. Numerical Simulation of Moisture Diffusion of Composite Solid Propellant[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 285-291.

复合固体推进剂湿扩散数值模拟研究

王玉峰, 李高春, 张旭东, 曲凯, 李金飞

(海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为考察湿度作用下复合固体推进剂内部水分扩散及分布情况, 揭示推进剂湿度老化机理, 进行了推进剂吸湿试验, 提出了推进剂内部水分扩散模型及有限元模型, 对推进剂内部水分扩散进行了有限元数值模拟, 分析了影响推进剂内部水分扩散的因素。结果表明, 采用湿度有限元方法能够模拟推进剂的吸湿过程; 温度对水分扩散有一定的影响, 温度越高, 扩散系数越大, 水分在推进剂中扩散越快; 推进剂试件尺寸对水分扩散也有一定的影响, 试件尺寸越大, 内部水分扩散速度越小, 到达平衡的时间越长。

关键词: 复合固体推进剂; 湿扩散; 有限元方法; 相对湿度; 水分分布

中图分类号: V512

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0285-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.2018010037

Numerical Simulation of Moisture Diffusion of Composite Solid Propellant

Wang Yufeng, Li Gaochun, Zhang Xudong, Qu Kai, Li Jinfei

(Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to elucidate the humidity aging mechanism of composite solid propellant, the diffusion and the distribution of moisture inside the composite solid propellant under humidity was evaluated through the hygroscopic test of propellant. The mathematical and the FE model of moisture diffusion were proposed. The FEM was employed to simulate the moisture diffusion inside propellant. Moreover, the factors that affect the moisture diffusion were analyzed. The results showed that the humidity FEM can be used to simulate the hygroscopic process inside propellant. The temperature can affect the moisture diffusion. The higher the temperature is, the greater the coefficient and the diffusion speed of moisture are. Furthermore, the dimension of propellant specimen can also affect the moisture diffusion. That is, the diffusion speed of moisture becomes smaller with increasing the dimension of propellant specimen, and then the time to reach equilibrium becomes longer.

Keywords: composite solid propellant; moisture diffusion; finite element method; relative humidity; moisture distribution

引言

固体火箭发动机作为动力装置, 其寿命是整个



收稿日期: 2015-11-17 修回日期: 2016-06-21;
作者简介: 王玉峰(1978-), 男, 河南睢县, 博士, 讲师, 研究方向为固体发动机及推进剂应用; 李高春(1978-), 男, 浙江临海, 博士, 副教授, 研究方向为固体发动机及推进剂应用; 张旭东(1978-), 男, 山东文登, 博士, 讲师, 研究方向为固体发动机及推进剂应用。

导弹系统可靠性的重要保证, 而发动机的寿命在很大程度上取决于固体推进剂的性能。固体推进剂是由多种组分构成的聚合物^[1], 是一种化学不稳定材料, 在组分称量、混合搅拌、浇注以及贮存和使用过程中将会暴露于各种温度和湿度环境中。许多学者^[2-9]通过试验研究表明, 固体推进剂在环境湿度作用下, 其中的氧化剂容易吸收水分, 将引起粘合

剂水解, 化学键断裂, 高温高湿环境下更为显著, 受潮后推进剂的力学性能下降。但同时又发现, 吸湿后的推进剂可以采用干燥法恢复其性能, 恢复程度取决于推进剂的配方特性、吸湿程度、干燥条件和干燥时间。

研究湿度引起的推进剂破坏机理, 最重要的前提是要知道推进剂内部水分的分布情况, 这些信息可以通过试验获得, 但试验吸湿时间长、测定水分浓度场难度很大。利用相对湿度处理方法, 基于热-湿参数对应原则, 采用水分扩散有限元模型模拟推进剂内部水分的扩散过程和分布情况以及湿扩散的影响因素, 不失为一种理想的探求方法。

1 水分扩散方程及条件

1.1 水分扩散方程

固体推进剂内部水分传递过程符合 Fick 扩散定律^[10], 可以用下述方程表示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: $C=C(x, y, z, t)$ 是与位置和时间有关的水分浓度分布函数, D 是水分扩散系数。

可以看出, 水分在推进剂内部的传递过程与导热过程式(2)有相似之处, 可以通过引入水分扩散系数来处理推进剂内部的水分扩散问题。

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

式中: T 为温度; α 为热导率。

1.2 初始条件

为求解上面的水分传递方程, 进而求出推进剂内部的湿度场, 所以必须知道推进剂初始时刻的湿度分布, 即: $C_{t=0}=C_0(x, y, z)$ 。

1.3 边界条件

和导热问题相似, 湿扩散计算时, 除了要知道初始条件外, 还要知道推进剂表面与周围介质之间进行水分交换的规律, 即表面吸湿边界条件:

$$\begin{cases} S_{\Gamma} : C = C_s(x, y, z, t), (x, y, z) \in S_{\Gamma} \\ S_n : -D \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right) = q_s \\ S_{\Gamma} : -D \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right) = h(C_s - C_f) \end{cases}$$

式中: C_s 为推进剂表面湿度; C_f 为环境湿度; h 为表面湿传递系数。

2 有限元分析

从上面的分析可以看出, 水分扩散的有限元计算和热传导有限元计算^[11]相似, 可以利用热力学分析模块进行湿度场计算^[12]。但是存在很大差别, 主要是因为导热过程中的温度在不同的材料界面是连续的, 而水分浓度在不同材料的界面处是不连续的。

在一定的温度条件下, 材料的吸湿能力的极大值用饱和湿度 C_{sat} 来描述。它表征材料在此温度下的吸湿能力。对于不同的材料, 其吸湿能力是不一样的, 所以 C_{sat} 也就不一样。在多种材料的交界处, 湿度 C 将不再是连续的, 限制了有限元工具求解推进剂内部的湿扩散, 为了解决这个问题, 引入“相对湿度”的概念 $W=C/C_{sat}$, 表示局部水分浓度与对应的饱和水分浓度的比值代替局部水分浓度^[13]。 $W=0$ 表示水分浓度为0, 材料完全干燥, $W=1$ 表示材料已经达到水分饱和浓度, 可以证明, W 是一个在多材料界面处连续的量, 于是方程(1)转化为:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

利用“相对湿度”的处理方法, 可通过热分析模块进行湿扩散有限元数值模拟, 热-湿之间参数的对应关系如表1所示。

表1 热-湿参数对应关系

Tab. 1 Corresponding parameter between heat and moisture

热传导		水分扩散	
场变量	单位	场变量	单位
T	°C	W	1
ρ	kg/m ³	1	1
K	W/m·°C	$D \cdot C_{sat}$	kg/s·m
c	J/kg·°C	C_{sat}	kg/m ³

3 固体推进剂湿扩散性能参数

表征推进剂吸湿性能的参数有: 扩散系数 D 、饱和水分浓度 C_{sat} 和溶解度 S 。

3.1 湿扩散系数

湿度扩散系数 D 通常用 Arrhenius 方程来描述^[14], 即:

$$D = D_0 \exp(-E_d/RT) \quad (4)$$

式中: T 为绝对温度(K); D_0 为指前因子, 单位为 m^2/s ; R 为 Boltzmann 常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$; E_d 为活化能, 是具有能量因子的常数。

为测定推进剂试件的湿度扩散系数, 本文对推进剂试件进行了吸湿性能试验。

3.1.1 吸湿性能试验

推进剂试件形状为长方体, 尺寸为 $120 mm \times 25 mm \times 10 mm$ 。试验过程如下: (1) 试验开始前, 先将推进剂试件在一定的温度下 ($60^\circ C$) 干燥; (2) 将推进剂试件放入恒温恒湿箱内, 相对湿度为 85%, 温度分别控制在 $10^\circ C$ 、 $30^\circ C$ 、 $50^\circ C$; (3) 定期将试件取出, 迅速去除试件表面的水珠, 称其重量, 然后将试样立即放回。吸湿率按下式计算:

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (5)$$

式中: M_t 为 t 时刻试件吸湿率(%); W_t 为 t 时刻试件的重量; W_0 为试件吸湿前的干重量。

3.1.2 参数确定

将推进剂试件吸湿率随时间的变化绘制 $M_t-t^{1/2}$ 曲线, 如图 1 所示。从图中可以看出, 在吸湿初期, 吸湿率与时间 $t^{1/2}$ 的关系呈线性, 基本符合 Fick 定律, 且初期的吸湿速率较快, 后期吸湿速率逐渐变缓, 最后趋于平衡。从图中可以看出, 推进剂试件吸湿受温度影响较大。温度越高, 水分扩散速率较快, 试件吸湿达到饱和所需的时间较短, 且平衡吸湿率越大; 温度越低, 水分扩散速率较慢, 试件达到饱和所需时间越长。

吸湿初始阶段的斜率为:

$$K = \frac{M_{t_2} - M_{t_1}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \quad (6)$$

式中: M_{t_2} 、 M_{t_1} 分别为 t_2 、 t_1 时刻的吸湿率(%)。

利用(6)式, 可以求得:

$$D = \left(\frac{l\sqrt{\pi}}{4M_{\max}} \right)^2 \left(\frac{M_{t_2} - M_{t_1}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2$$

式中: M_{\max} 、 l 分别为试件的最大吸湿率(即平衡吸湿率)、试件的厚度。

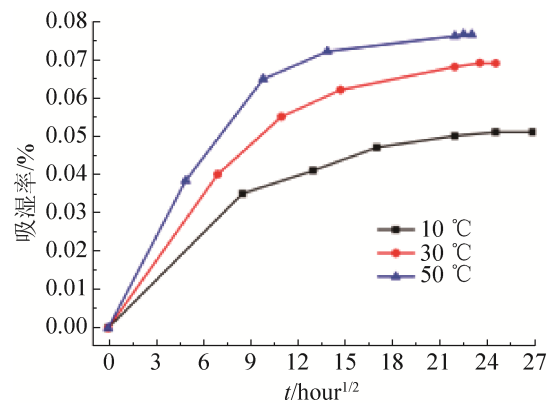


图 1 吸湿动力学曲线

Fig. 1 Curve of moisture absorption

不同温度下的 D 和 K 如表 2 所示。从表中可以看出, 随着温度的增加, 扩散系数和扩散速率均增加。

表 2 试件在相对湿度 85% 下的 D 和 K

Tab. 2 D and K of specimens at relative humidity 85%			
温度/ $^\circ C$	10	30	50
$D/(m^2/h)$	1.2844×10^{-7}	1.3747×10^{-7}	2.0614×10^{-7}
$K/h^{-1/2}$	4.12×10^{-5}	5.77×10^{-5}	7.84×10^{-5}

式(4)两边取对数, 进行线性处理, 得:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{E_d}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (7)$$

式中, $\ln D_0$ 和 E_d/R 为直线的截距和斜率。

根据试验结果, 利用最小二乘法即可求出方程中的 D_0 和 E_d 分别为: $5.18 \times 10^{-6} m^2/h$ (即 $1.44 \times 10^{-9} m^2/s$)、 $8834 J/mol$ 。

3.2 溶解度

水分在推进剂中的溶解度 S 用 Arrhenius 方程

表示为^[10]:

$$S = S_0 \exp(-E_s/RT) \quad (8)$$

式中, S_0 为指前因子, 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{atm})$; E_s 为活化能, 单位 J/mol 。

3.3 饱和水分浓度

饱和水分浓度 C_{sat} 与水分溶解度 S 有以下关系^[13]:

$$S = C_{sat} / P_{ext} \quad (9)$$

P_{ext} 为某一环境温度和湿度条件下的环境蒸汽压。

而相对湿度的定义就是实际蒸汽压与饱和蒸汽压 P_s 之比, 即:

$$RH = \frac{P}{P_s} \times 100\% \quad (10)$$

饱和蒸汽压与温度又有如下关系^[14]:

$$P_s = P_0 \exp(-E_p/RT) \quad (11)$$

式中, P_0 为指前因子, 单位为 atm ; E_p 为活化能, 单位 J/mol 。

所以饱和水分浓度与环境温度和相对湿度有关, 即:

$$C_{sat} = S \cdot P_s \cdot RH \quad (12)$$

可以看出, 溶解度不受湿度影响, 仅为温度的函数。一定温度下, 推进剂饱和水分浓度与周围环境空气的相对湿度成正比, 比例系数为该温度下饱和蒸汽压与该温度下溶解度之积。

4 湿扩散有限元计算及影响因素分析

4.1 有限元模型

推进剂试件尺寸为 $25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$, 由于对称, 取 $1/2$, 即 $12.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 进行湿扩散有限元分析, 有限元网格划分如图 2 所示, 单元类型为八节点六面体一次单元, 单元总数为 15 600。

4.2 物性参数

根据前面的分析, 得到推进剂湿扩散模型中的相关参数, 如表 3 所示, 进而得到 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿

度为 85% 下的计算参数, 如表 4 所示。

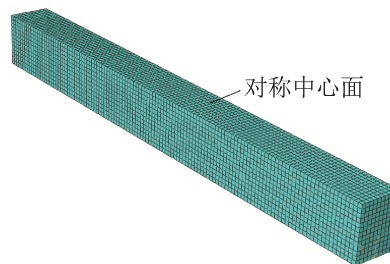


图 2 网格划分
Fig. 2 Finite element grid

表 3 D 和 C_{sat} 公式中的参数值
Tab. 3 Parameters in C_{sat} and D

参数	参数值
$D_0/(\text{m}^2/\text{h})$	5.18×10^{-6}
$E_d/(\text{J}/\text{mol})$	8834
$S_0/(\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{atm})$	1.5×10^{-4}
$E_s/(\text{J}/\text{mol})$	-34097
P_0/atm	1.37×10^{11}

表 4 85%RH 下湿扩散参数
Tab. 4 Parameters of moisture diffusion at 85%RH

$D/(\text{m}^2/\text{h})$	$C_{sat}/(\text{kg}/\text{m}^3)$
1.46×10^{-7}	3.87

4.3 初始条件和边界条件

对推进剂试件来说, 当 $t=0$ 时, 其吸湿量为 0, 即为初始条件, 试件上表面设为对称边界条件, 而水分的扩散是从试件的外表面进入内部的, 所以将其余五个外表面定义为湿度的边界条件, 环境相对湿度 $W=85\%$ 。

4.4 计算结果与分析

图 3 为推进剂试件的瞬态吸湿图。从图中可以看出, 由于是设定的湿度边界条件, 五个外表面与环境湿度迅速达到平衡, 水分从这几个外表面扩散进入推进剂内部, 随着时间的增加, 含湿量从外向内逐渐增加, 扩散大约 330 h 后, 整个推进剂试件与环境达到湿平衡。

推进剂试件吸湿过程中, 不同时刻、不同位置的吸湿量不同, 不同时刻试件厚度方向的水分分布如图 4(a)所示。从图中可以看出, 在某一时刻, 左

侧迅速达到平衡值, 厚度方向的湿含量从左至右逐渐减少, 模型右侧的湿含量为 0, 330 h 后, 水分完全扩散进入试件内部, 吸湿量曲线的波动越来越小, 最后达到平衡值。

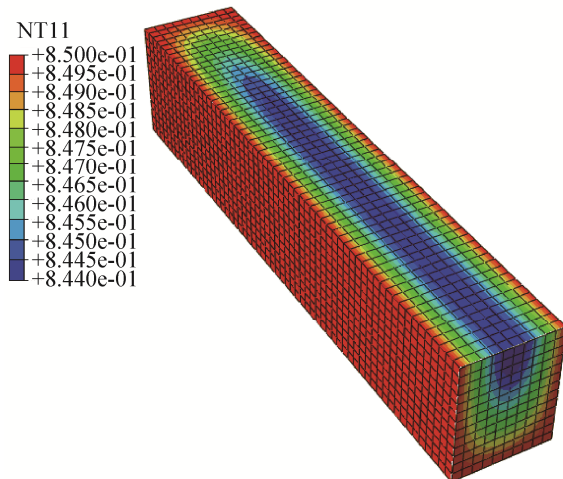


图 3 $t=330$ h 时水分分布
Fig. 3 Moisture distributions at $t=330$ h

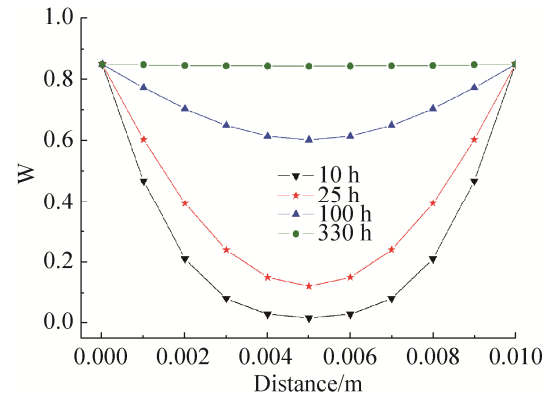
图 4(b)、图 4(c)分别为沿长度方向和宽度方向不同时刻的水分分布, 同沿厚度方向一样, 由于侧面是设定的湿度边界条件, 迅速达到平衡值, 吸湿一定时间($t=10, 25, 100, 330$ h)后, 吸湿量不断增加, 越来越多的水分扩散进入, 曲线的波动越来越小, 最后曲线接近平直。

推进剂试件的中心点的含水率随吸湿时间变化关系如图 5 所示。从图中可以看出, 在吸湿的初始阶段, 其含水率没有发生变化, 随着吸湿时间的增加, 大约 1 h 后, 含水率开始增加, 曲线变陡, 含水率增加速度较快, 100 h 后, 曲线变缓, 含水率增加较慢, 其后推进剂试件的含水率略有增加, 但变化不大, 逐渐趋于平衡含水率。

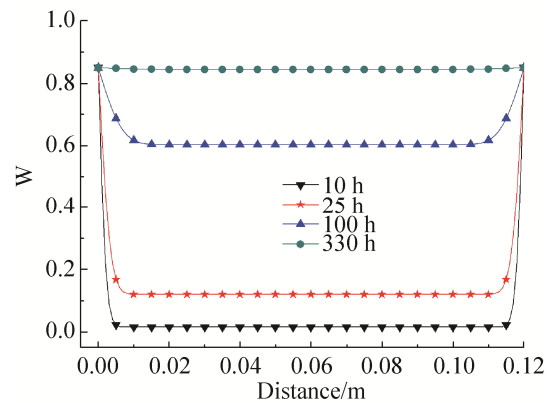
现将 $T=30$ °C 的有限元计算结果与试验结果进行比较, 如图 6 所示。从图中可以看出, 试验结果与有限元计算结果吻合较好, 说明采用有限元方法能够较好地对固体推进剂的吸湿过程进行模拟。

但图 6 也表明, 有限元计算结果与试验结果有一定的偏差, 分析其原因主要是: (1)在有限元计

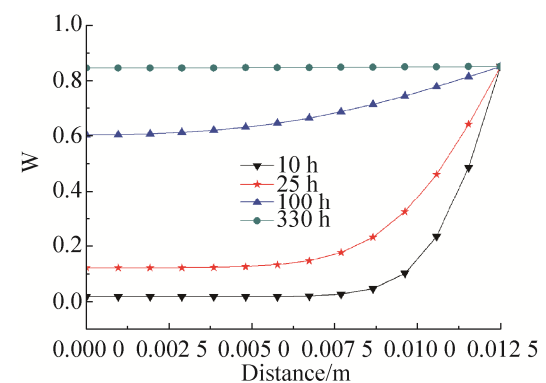
算中, 推进剂假设为均质材料, 与实际有差异; (2) 计算参数 D 、 C_{sat} 的取值以及边界条件、网格划分等方面存在误差; (3) 试验方面也受到试验条件及试件等方面的影响。



(a) 厚度方向



(b) 长度方向



(c) 宽度方向

图 4 水分沿不同方向中心线的分布
Fig. 4 Moisture distributions along different dimension

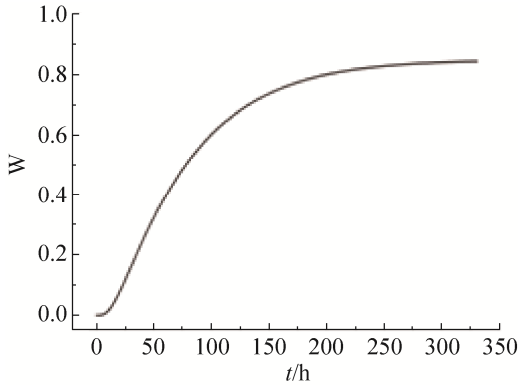


图5 中心点的湿度随时间变化曲线
Fig. 5 Curve of moisture vs time at center node

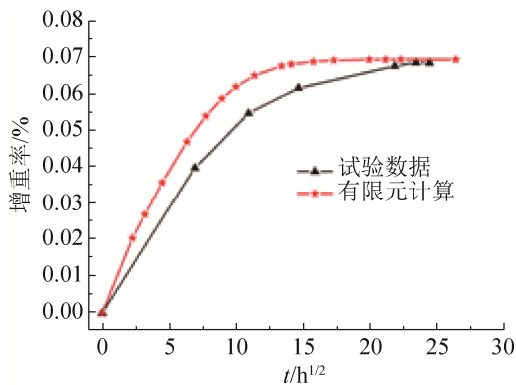


图6 有限元计算结果与试验结果比较
Fig. 6 Comparison of results between FEM and experiment

4.5 影响因素分析

4.5.1 温度的影响

推进剂的 D 和 C_{sat} 受环境温度的影响, 因此, 温度是影响推进剂吸湿过程的重要因素。为考察环境温度对推进剂试件中湿扩散的影响, 进行了 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下推进剂试件的吸湿数值模拟。

图 7 为不同温度下推进剂试件中心节点含湿率与时间的关系, 初始条件和边界条件同上。从图中可以看出, 温度越高, 扩散系数越大, 水分在推进剂中扩散速度较大, 同一时间内试件内部湿度越大, 但达到平衡的时间基本差不多。主要是因为, 温度越高, 水分子扩散速度越快, 推进剂基体溶胀越大, 吸水的速度也就越快, 吸水量就越大, 溶胀应力和扩散渗透作用越强。所以在推进剂在贮存过程中一定要注意贮存环境, 应避免高温高湿环境。

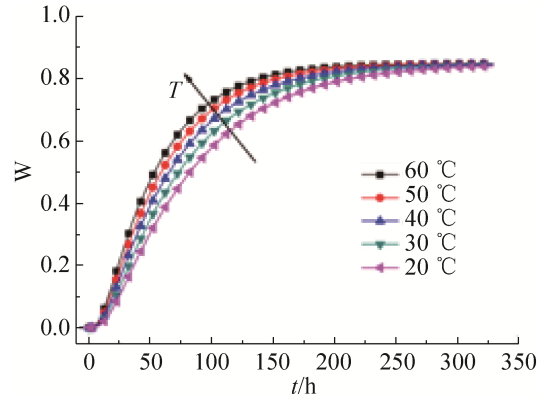


图7 温度对湿扩散的影响
Fig. 7 Effect of temperature on moisture diffusion

4.5.2 试件尺寸的影响

为考察推进剂试件尺寸对湿扩散的影响, 对不同推进剂时间尺寸中的湿扩散进行了有限元计算, 试件尺寸分别为 $12.5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 、 $25\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ 。图 8 为推进剂试件在吸湿过程中试件尺寸对其中心节点含水率的影响。从图中可以看出, 随着推进剂试件尺寸变大, 推进剂内部的水分扩散速度明显减小, 到达平衡的时间越来越长。

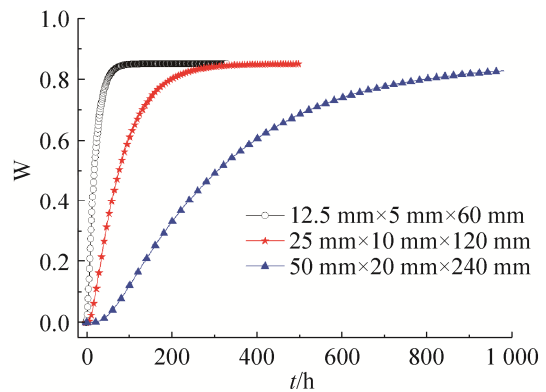


图8 试件尺寸对湿扩散的影响
Fig. 8 Effect of size on moisture diffusion

5 结论

通过试验和有限元分析计算, 结论如下:

- (1) 利用“相对湿度”的处理方法, 可通过热分析模块对固体推进剂的吸湿扩散进行湿扩散有限元数值模拟。

(2) 从推进剂吸湿试验中能够测出试件的湿扩散系数和扩散速率, 其受温度影响较大。温度越高, 试件吸湿达到饱和所需的时间较短, 且平衡吸湿率越大; 温度越低, 水分扩散速率较慢, 试件达到饱和所需时间越长。

(3) 温度越高, 扩散系数越大, 水分在推进剂中扩散速度越快。

(4) 推进剂试件的尺寸对水分扩散也有一定的影响, 推进剂试件尺寸越大, 推进剂内部的水分扩散速度越小, 到达平衡的时间越长。

参考文献:

- [1] Royce W B. Research on propellant components II. Aging studies of Hydroxyl-terminated polybutadiene based binder[D]. The University of Delaware, 2004.
- [2] 池旭辉, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE推进剂湿老化特性研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 236-240.
Chi Xuhui, Peng Song, Pang Aimin, et al. Humidity ageing behavior of NEPE propellant[J]. Chinese journal of energetic materials, 2009, 17(2): 236-240.
- [3] 王玉峰, 洪亮, 李高春. 固体推进剂受潮对其力学性能影响的研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(5): 524-526, 534.
Wang Yufeng, Hong Liang, Li Gaochun. Research on Effect of Wetting on the Solid Propellants' Mechanical Properties[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(5): 524-526, 534.
- [4] 颜熹琳, 李敬明, 周阳, 等. 高聚物粘结炸药温湿度载荷加速老化试验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 412-414, 419.
Yan Xilin, Li Jingming, Zhou Yang, et al. Temperature humidity load accelerating age tests of PBX[J]. Chinese journal of energetic materials, 2009, 17(4): 412-414, 419.
- [5] 张旭东, 曲凯, 王丕毅, 等. 高温高湿条件下复合固体推进剂装药老化研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(3): 285-288.
Zhang Xudong, Qu Kai, Wang Piyi, et al. Research on the Ageing Behavior of Composite Solid Propellant Grain under the Condition of High Temperature and High Humidity[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(3): 285-288.
- [6] 张旭东, 曲凯. 氢键在丁羟推进剂湿老化与干燥恢复中的作用规律[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(4): 482-487.
Zhang Xudong, Qu Kai. Action of hydrogen bond during moisture ageing and drying recovery of HTPB propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(4): 482-487.
- [7] 张旭东, 董可海, 曲凯, 等. 丁羟推进剂吸湿分级[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(4): 499-503.
Zhang Xudong, Dong Kehai, Qu Kai, et al. Degree of moisture absorption HTPB propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(4): 499-503.
- [8] 张旭东, 董可海, 曲凯, 等. 丁羟推进剂吸湿特性[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(6): 838-842.
Zhang Xudong, Dong Kehai, Qu Kai, et al. Study on the moisture absorption law of HTPB propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(6): 838-842.
- [9] Brownell R M, Biddle R A, Black R E. Temperature and humidity aging studies on low flame temperature propellants[C]//USA: AIAA, 1971: 664.
- [10] Chang S T, Han S, Malone B. Numerical analysis of moisture propagation and chemical reaction in a solid propellant[C]//USA: AIAA, 2000: 3180.
- [11] 王玉峰, 邢耀国, 李高春, 等. 温度循环条件下固体装药应力及累积损伤研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1132-1137.
Wang Yufeng, Xing Yaoguo, Li Gaochun, et al. Stress and cumulative damage of solid charge under temperature cycling condition[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(5): 1132-1137.
- [12] 王玉峰, 邢耀国, 李高春, 等. HTPB推进剂药柱的湿扩散及湿应力有限元分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 651-656.
Wang Yufeng, Xing Yaoguo, Li Gaochun, et al. The Finite Element Analysis of Moisture Diffusion and Stress in HTPB Propellant Grain[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(6): 651-656.
- [13] 谢斌. 高密度芯片封装中界面分层的数值模拟研究及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Xie Bin. Numerical simulation study and application of interface delamination in high density electric packaging [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [14] Cuddihy E F. The aging correlation (RH+T): relative humidity(%) + temperature (°C)[J]. Corrosion Science (S0010-938X), 1987, 27(5): 463-474.