

doi: 10.7690/bgzdh.2013.01.026

# 基于 Matlab 的熔注炸药凝固过程模拟

刘雪梅

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 针对目前对凝固模拟的研究多局限于数值模型的算法上, 距实时显示尚有一定差距的问题, 通过分析熔注炸药凝固工艺特点, 结合热力学理论, 建立熔注炸药凝固过程热力学模型。基于 Matlab 界面开发程序, 对凝固界面进行数值分析, 得到任意时刻装药凝固界面特性方程。通过对逐层凝固过程模拟界面的形成、生长规律进行试验验证。验证结果表明: 模拟曲线与试验曲线均近似符合 4 次多项式形式, 模拟结果与测试结果一致, 能实现凝固过程的实时模拟。

**关键词:** 熔注炸药; 注装; 凝固; 热力学模型

**中图分类号:** TJ410.5+2 **文献标志码:** A

## Simulation for Solidification of Melt-Cast Explosives Based on Matlab

Liu Xuemei

(State Key Laboratory of Explosion Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Most of the solidification simulation study focused on numerical model algorithm, it can not realize real time display. According to the analysis of the characteristics for the solidification process of the melt-cast explosive, the main task is to establish the thermodynamic model by using the combination of experimentation and theoretical analysis from the micro thermodynamics point. Based on the Matlab interface development process, carry out numerical analysis of solidification interface, the characteristic equations at any time are obtained. The simulation and the test curves are both four degree polynomial through the experimentation verification for the formation and the growth law of the solidification interface. The simulation results are consistent with the test, achieving the display of the real-time simulation system of the solidification.

**Key words:** melt-cast explosive; cast loading; solidification; thermodynamic model

### 0 引言

由于熔注炸药的装药工艺简单, 凝固效率高, 在大口径弹装药中得到了广泛应用, 但常规的凝固技术容易产生气孔、底隙、缩孔等缺陷。逐层凝固是将弹体以一定的速度放入一定温度的低温环境中, 实现装药从下到上逐步固化, 凝固过程中可保证熔融炸药不断流入已凝固炸药的空隙处, 最终获得无缺陷的药柱。另外, 在凝固过程中采用加压技术, 不仅使晶粒排列紧密, 而且提高了熔融炸药的微观补缩能力, 明显提高了装药质量, 是一种非常具有前途的装药方法<sup>[1]</sup>。

由于工艺过程自身的特点, 对炸药凝固过程无法实现实时监测, 导致了装药质量控制的盲目性。凝固过程数值模拟通过数值方法预测和揭示凝固过程中物理行为各方面的细节和轨迹<sup>[2-3]</sup>, 从而为改进和优化注装工艺提供决策依据, 是该领域近年来兴起的一项高科技前沿技术。前人<sup>[4-9]</sup>对于凝固模拟的研究多局限在数值模型的算法上, 距实时显示尚有一定的差距。笔者在经过大量试验的基础上,

结合相应的理论分析, 对凝固过程进行建模与数值分析, 以实现凝固过程的实时显示和监测。

### 1 基于 Matlab 的模拟算法

炸药凝固过程中的热交换方式包括: 热传导、热对流及热辐射<sup>[10-12]</sup>, 如图 1 所示。

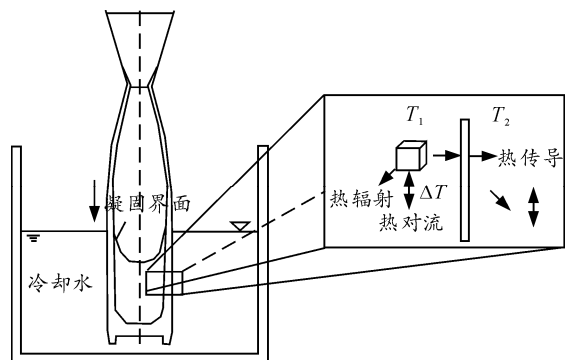


图 1 逐层凝固弹丸凝固过程热交换示意图

#### 1.1 热交换方程

热交换方程如式 (1):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

收稿日期: 2012-09-28; 修回日期: 2012-11-23

作者简介: 刘雪梅(1985—), 女, 山东人, 硕士研究生, 从事炸药与爆炸理论研究。

式中： $T$  为弹丸温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\rho$  为密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $C_p$  为比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $\lambda$  为导热系数， $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

假设单位体积、单位时间内固相率的增加为  $\frac{\partial f_s}{\partial \tau}$ ，因此潜热放出的发热量为  $\rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau}$ ，其中， $L$  为潜热， $\text{J}/\text{kg}$ ； $f_s$  为固相率。此时的传热方程变为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad (2)$$

采用热焓法计算熔注炸药低比压顺序凝固过程中的潜热。熔注炸药的焓可定义为：

$$H = \int_0^T C_p dT + (1 - f_s)L \quad (3)$$

因此，熔注炸药凝固过程的热传导微分方程为：

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

### 1.2 边界条件

通过合理的简化，弹体与冷却水、熔注炸药与弹体间的热交换为对流换热，属于第 3 类边界条件，如式 (5) 和式 (6)：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_1 (T_{\text{熔注炸药}} - T_{\text{弹体}}) \Big|_{\Gamma} \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_2 (T_{\text{弹体}} - T_{\text{冷却水}}) \Big|_{\Gamma} \quad (6)$$

式中： $\alpha_1$  为熔注炸药与弹体之间的对流换热系数；

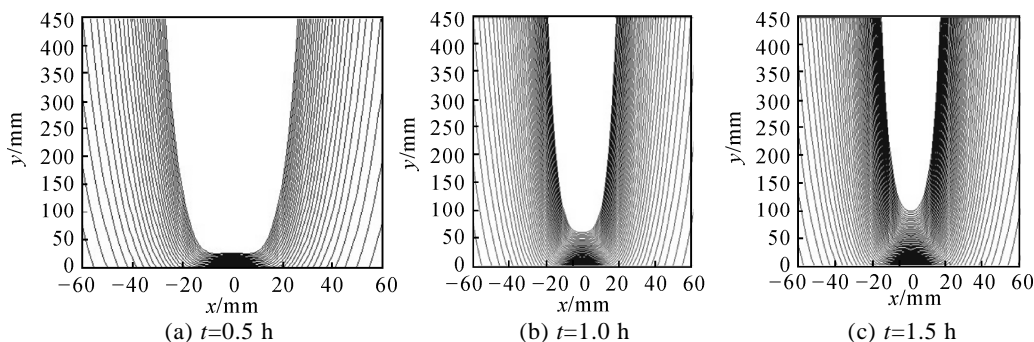


图 3 不同时刻凝固界面模拟曲线

从图 3 中可以看出，熔注炸药逐层凝固过程界面模拟曲线呈逐渐向内收缩的抛物线形，不同时刻凝固界面方程为：

$$0.5 \text{ h: } y = 7.301 - 0.037x^2 + 3.666 \times 10^{-5}x^4 \quad (7)$$

$$0.75 \text{ h: } y = 8.975 + 0.042x^2 + 2.942 \times 10^{-5}x^4 \quad (8)$$

$$1.0 \text{ h: } y = 10.981 - 0.065x^2 + 1.208 \times 10^{-5}x^4 \quad (9)$$

$$1.25 \text{ h: } y = 15.752 + 0.051x^2 + 4.608 \times 10^{-5}x^4 \quad (10)$$

$$1.5 \text{ h: } y = 19.347 - 0.068x^2 + 3.630 \times 10^{-5}x^4 \quad (11)$$

$$1.75 \text{ h: } y = 23.301 + 0.096x^2 + 1.717 \times 10^{-5}x^4 \quad (12)$$

$$2.0 \text{ h: } y = 30.610 - 0.117x^2 + 6.740 \times 10^{-5}x^4 \quad (13)$$

$\alpha_2$  为弹体与冷却水之间的对流换热系数。

基于上述凝固过程界面成长模型，运用 Matlab GUI 程序包，建立凝固界面实时成长计算程序，框图如图 2。

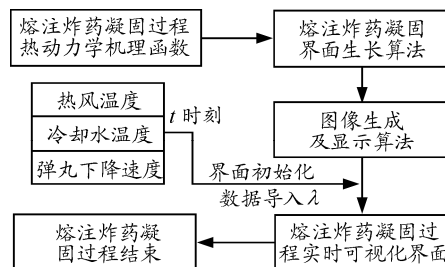


图 2 熔注炸药凝固模拟界面程序框图

## 2 模拟计算结果

### 2.1 初始条件

为实现对凝固过程的实时模拟，需按试验条件对上述模型进行初始化，笔者选用的初始条件为：弹丸下降速度， $2.5 \text{ mm}/\text{min}$  (从弹带起)；弹丸停止位置，距口部  $120 \text{ mm}$ ；静止护理时间， $180 \text{ min}$ ；药温及弹体初始温度， $98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ；冷区温度， $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ；热区温度， $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 模拟计算结果

利用建立的计算程序，得到的炸药凝固过程界面生长的模拟曲线如图 3 所示。

从上述模拟方程可见，凝固界面模拟方程结构相同，不同时刻变化实质是多项式系数的变化，多项式系数符合一定的规律，这使实时显示成为可能。

## 3 试验验证

### 3.1 试验装置

为了对数值模拟结果进行验证，笔者对凝固界面的成长过程进行了测试，模拟测试装置如图 4。为保证两者的可比性，试验初始条件与模拟计算初始条件相同。

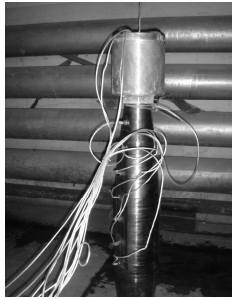


图 4 弹体温度分布测试传感器布置

### 3.2 试验结果

弹丸不同时刻的凝固界面测试结果如图 5。

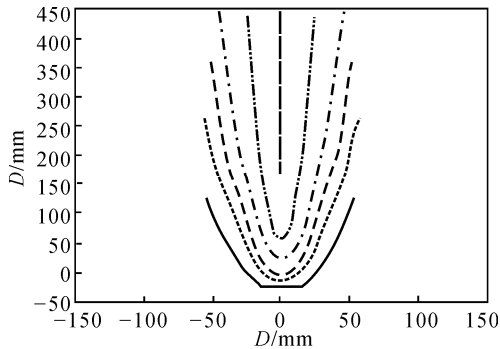


图 5 凝固界面成长过程曲线

从图 5 可见，起始凝固界面近似呈抛物线形，然后底部逐渐收缩，最后收缩为一条直线。对测试得到凝固界面随时间的变化规律进行拟合，得到凝固面位置-时间与凝固速度-时间曲线，如图 6。

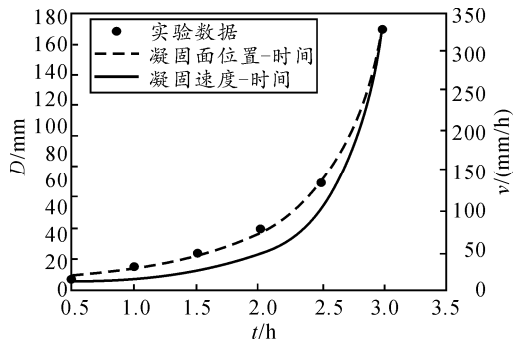


图 6 凝固界面位置、凝固速度与时间拟合曲线

通过对试验数据的拟合，可得凝固面的位置-时间关系为：

$$D = -2.33 + \frac{625.80}{4 \times (t - 3.93)^2 + 0.18}; R = 0.9980$$

凝固速度-时间关系为：

$$v = \frac{69.06}{(3.85 - t)^3 + 0.05}; R = 0.9995$$

从拟合结果来看，在保温段(0~3 h)，随着弹体进入冷却水部分的增加，凝固速度近似呈抛物线形增加，凝固界面曲线近似符合四次多项式。

将模拟结果中不同时刻凝固界面方程的常数项

随时间变化情况与试验所得的凝固面的位置-时间曲线进行相关性检验，相关系数  $R=0.9976$ 。从模拟和试验结果的对比可以看出，模拟曲线与试验曲线均近似符合四次多项式的形式，模拟结果与测试结果基本一致。

### 4 结论

笔者根据熔注炸药逐层凝固工艺特点，结合热力学的相关理论，建立了熔注炸药逐层凝固过程的热力学模型，得到了任意时刻炸药凝固界面特性方程矩阵，实现了逐层凝固过程的实时显示；通过试验对逐层凝固过程模拟界面的形成、生长规律进行了验证，两者符合较好。

### 参考文献：

- [1] 徐更光. 弹药高效毁伤关键技术集成与应用[J]. 含能材料, 2004, 12(z1): 119-121.
- [2] 刘焯, 刘瑞祥, 等. 凝固模拟的可视化研究[J]. 铸造, 2000, 49(6): 340-343.
- [3] Guillemin Jean-Philippe, Brunet Luc, Bonnefoy Olivier, et al. A Flow Time for Melt-Cast Insensitive Explosive Process[J]. France, 2007, 32(3): 1-8.
- [4] Robert Hatch, paul Braithwaite, Nathan Seidner, et al. Development of Cast Cure Explosives for Comp B Replacement[C]. Tucson: NDIA IM/EM Technology Symposium, 2009: 1-15.
- [5] Weibin Zhou, Yong Tian, Hongping Zhou. Process Monitoring of Cast Explosives Solidification Molding by online Multichannel Ultrasonic Measurement[C]. Shanghai: 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008: 25-28.
- [6] Benjamin J. Jones, Dawei Sun, Shankar Krishnan, et al. Experimental and numerical study of melting in a cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(1): 2724-2738.
- [7] Hamilton R W, See D, Butler S, et al. Multiscale modeling for the prediction of casting defects in investment cast aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 2(343): 290-300.
- [8] 赵镇南. 传热学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [9] Jean-Michel Bergheau, Roland Fourtunier. Finite Element Simulation of Heat Transfer[M]. Hoboken: ISTE Ltd and John Wiley&Sons, 2008.
- [10] KaKac S, Yener Y. Heat conduction[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
- [11] Inaldo L. Ferreira, Jose E. Spinelli, Jose C. Pires, et al. The effect of melt temperature profile on the transient metal/mold heat transfer coefficient during solidification[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 12(408): 317-325.
- [12] Jinn-Shing Leea, Chung-King Hsu. The thermal behaviors and safety characteristics of composition B explosive [J]. Thermochemica Acta, 2001, 367(368): 371-374.