

文章编号: 1006-9941(2009)04-0428-03

## 熔黑梯炸药凝固过程的数值模拟与实验验证

李敬明, 田 勇, 张 明, 郭朋林, 张伟斌

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为了解浇铸炸药的凝固过程,采用有限元法对熔黑梯炸药凝固过程中的温度场进行了模拟,并对凝固过程中可能产生的缩孔进行了预测。结果表明,熔黑梯炸药凝固过程中内外温差较大,中心位置附近的温度变化曲线在 75 °C 左右存在拐点,在药柱中间位置将出现缩孔和缩松。另外还采用热电偶对熔黑梯炸药凝固过程中的温度变化进行了测试,采用工业 CT 对固化后的熔黑梯药柱内部质量进行了检测,并将数值模拟结果和实验测试结果进行了对比,结果表明有限元方法可以对熔黑梯炸药凝固过程进行有效模拟。

**关键词:**物理化学; 熔黑梯炸药; 凝固; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; TG244

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.013

### 1 引 言

炸药浇铸是将炸药加热熔化后注入模具,冷却后凝固成具有一定形状和尺寸的药柱,是当前国内外一种广泛使用的装药技术。在炸药凝固过程中,容易在药柱内部出现疏松、缩孔及微裂纹等缺陷,这些都会降低产品质量,严重时甚至造成危险<sup>[1]</sup>。为了解决上述问题,国内外努力改进浇铸工艺,发展了多种浇铸装药技术,在炸药凝固规律及其特性、浇铸过程的热应力消除及产品内部质量检测等方面开展了大量工作。近年来,浇铸过程的数值模拟和仿真得到了很大发展,并已在金属铸造领域得到了广泛应用<sup>[2-5]</sup>,实现了浇铸工艺由传统的反复试验走向了计算机设计,对产品质量的改进起到了重要作用。但关于炸药浇铸过程的数值模拟在国内处还未见文献报道,如能在炸药浇铸技术中以一定的实验为基础,实现计算机模拟与仿真,描述浇铸的演变过程,将对提高产品质量和确保工艺安全起到重要作用。

熔黑梯(RHT)炸药的主要成分是 TNT 和 RDX,该类炸药在弹药装药中得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。本文主要对 RHT 炸药的浇铸凝固过程进行了数值模拟,研究了其温度场变化及缩孔的生成情况,并与试验测试结果进行了对比,为其浇铸工艺的设计和改进了提供了技术支撑。

### 2 试验及数值模型方法

为了对数值模拟结果进行验证,首先对无冒口补缩

的圆柱形 RHT 炸药浇铸过程中的温度场变化情况进行了试验研究。浇铸试验采用铝模具,尺寸为  $\Phi 110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ ,RHT 药柱的大小为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,其初始浇铸温度为 90 °C,试验过程中采用热电偶测试了不同点的温度变化情况,凝固模型及温度监测点位置示意图如图 1 所示。

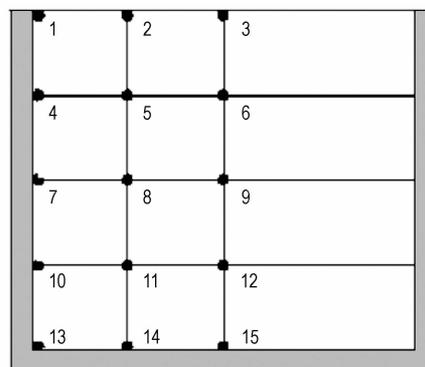


图 1 RHT 炸药凝固模型示意图

Fig. 1 Schematic figure of RHT explosive solidification model

采用有限元方法对 RHT 炸药的凝固过程进行了数值模拟,其中温度场分布采用不稳定热传导的偏微分方程进行计算<sup>[7]</sup>,并采用热焓法来处理凝固过程中的潜热释放,式(1)给出了具体的计算方程。温度场模拟的边界条件取第三类边界条件,即外界环境温度  $T_f$  和换热系数  $\alpha$  已知,如式(2)所示。表 1 给出了数值模拟所采用的材料性能参数、初始条件及边界条件参数。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{df_s}{dt} \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_f) \Big|_r \quad (2)$$

收稿日期: 2008-12-16; 修回日期: 2009-03-12

基金项目: 中国工程物理研究院基金(2005Z0504)

作者简介: 李敬明(1971-),男,副研究员,主要从事材料库存老化及性能研究。e-mail: jmlj7288@sina.com

式中,  $\rho$  为密度,  $c_p$  为比热容,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $\lambda$  为导热系数,  $L$  为结晶潜热,  $f_s$  为固相体积分,  $T_f$  为环境温度,  $\alpha$  为换热系数。

表 1 RHT 炸药及 Al 模具的性能参数

Table 1 Properties of RHT explosive and Al mould

items	$\lambda$ / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\rho$ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_p$ / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$L$ / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$T_m$ / $^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$T_f$ / $^{\circ}\text{C}$
explosive	0.26	1710(25 $^{\circ}\text{C}$ ) 1500(90 $^{\circ}\text{C}$ )	1.181	37.5	80	10	25
mould	240	2700	0.9	-	-	10	25

Note:  $\lambda$  is thermal conductivity,  $\rho$  is density,  $c_p$  is specific heat,  $L$  is latent heat,  $T_m$  is melting point,  $\alpha$  is heat transfer coefficient,  $T_f$  is environment temperature.

缩孔和缩松采用固相率法和补缩距离相结合的方法进行预测, 当固相率大于某临界值(本实验取 0.7)且区域大于补缩距离(本实验取 5 mm)时, 则可能产生缩孔和缩松。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 温度场数值模拟结果及试验对比

利用上面的模型和参数, 计算了 RHT 炸药在浇铸过程中不同时刻的温度分布情况, 图 2 给出了 7200 s 时炸药和模具的温度场分布图。从图 2 可见, RHT 炸药内部的温度场呈现对称的椭圆形分布, 另外由于 RHT 炸药的导热系数较小, 因而凝固过程中其不同部位的温度差较大, 如图 2 中炸药内外温度差达 40  $^{\circ}\text{C}$  左右。

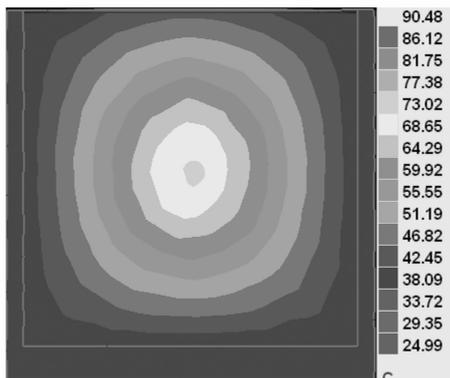


图 2 RHT 炸药凝固 7200 s 时的温度场分布  
Fig. 2 Distribution of temperature field of RHT explosive solidification at 7200 s

图 3 给出了第 1、4、7、10、13 点温度变化曲线的数值模拟结果和热电偶实验测试结果曲线, 图 4 给出了第 2、5、8、11、14 点温度变化曲线的数值模拟结果和热电偶实验测试结果曲线, 图 5 给出了第 3、6、9、12、15 点温度

变化曲线的数值模拟结果和热电偶实验测试结果曲线。

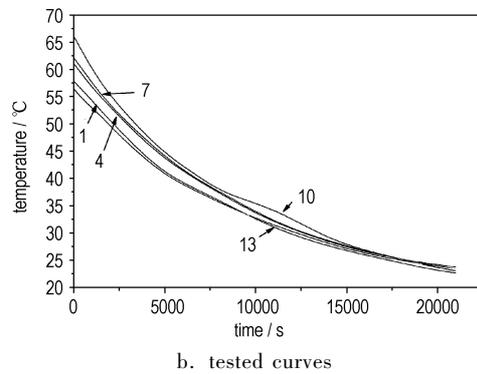
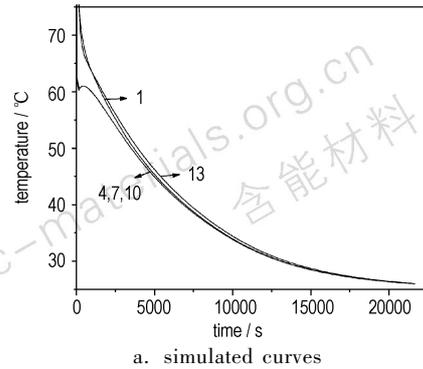


图 3 第 1、4、7、10、13 点温度变化曲线  
Fig. 3 Temperature change curves of 1, 4, 7, 10, 13 points

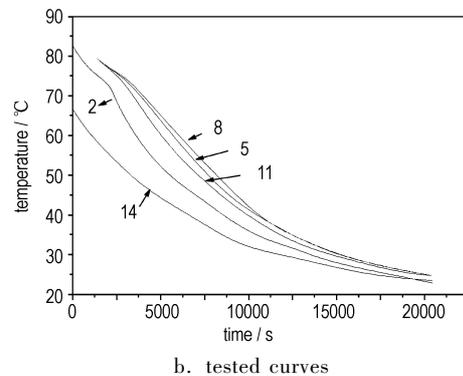
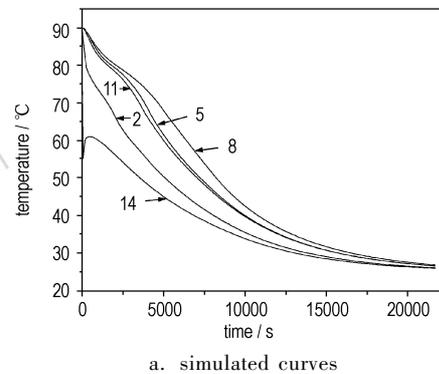
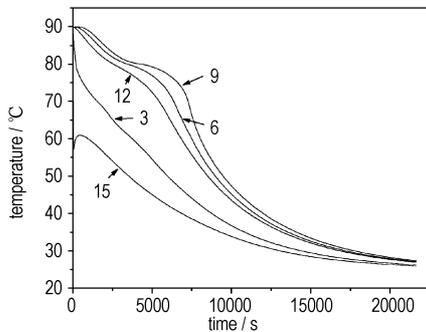
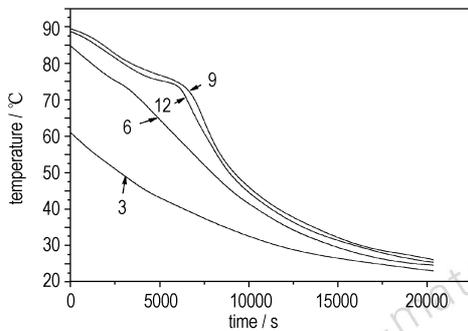


图 4 第 2、5、8、11、14 点温度变化曲线  
Fig. 4 Temperature change curves of 2, 5, 8, 11, 14 points

从图3~图5可见,RHT炸药中不同位置温度变化趋势的数值模拟结果和实验测试结果基本一致,其中第1、4、7、10、13点和模具相接触,换热较快,因而其温度下降较快且温度变化速率相差不大。其它各点均呈现出距外表面越远,温度下降速率越慢的变化趋势。此外,靠近中心位置的第6、8、9、12等点的温度变化曲线均在75℃左右出现了一个明显的拐点,这主要是由于相变潜热的存在引起的,即在凝固过程中RHT炸药中的TNT在相转变时将释放出一定的热量,而中心位置附近由于热量传递较慢,因而在相转变区积累了一定的热量,而当温度下降到相变温度以下时,TNT将不再释放相变潜热,故在相转变区出现了一个热量积累峰,因而其温度变化曲线出现一个明显的拐点。



a. simulated curves



b. tested curves

图5 第3、6、9、12、15点温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curves of 3,6,9,12,15 points

### 3.2 缩孔预测与验证

图6给出了RHT凝固过程中可能出现缩孔的预测图(右侧标注为孔隙率),从图6可见,RHT炸药在凝固后中上部将出现缩孔和缩松。图7给出了凝固后药柱内部质量的CT检测结果,在RHT药柱的上部出现了明显的缩孔,在药柱中部位置出现了小的缩孔和缩松。当然,由于实际过程中炸药和模具边界作用力的不一致,数值模拟的缩孔预测形状和实际测试中缩孔的形状存在一定差异,但缩孔和缩松的位置和分布基本吻合。

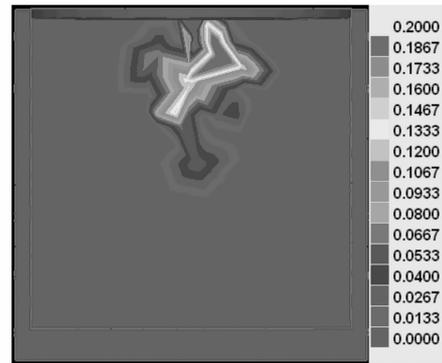


图6 RHT炸药凝固缩孔预测图

Fig.6 Shrinkage prediction of RHT explosive

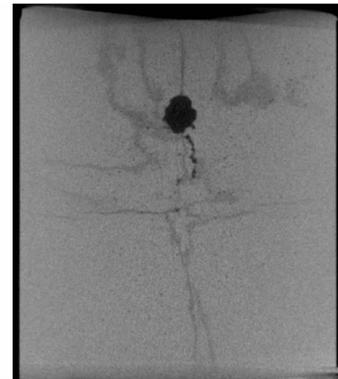


图7 RHT炸药内部质量CT检测结果

Fig.7 ICT photograph of solidified RHT explosive

## 4 结论

对RHT炸药凝固过程中的数值模拟和实验测试表明,凝固过程中RHT炸药内外温差较大,且中心位置附近的温度变化曲线在75℃左右存在拐点,在浇铸件四周正常换热条件下RHT中间位置将出现缩孔和缩松。另外,RHT炸药凝固过程数值模拟结果和实验测试结果的对比也表明有限元方法可以对RHT炸药凝固过程进行有效模拟。

在本文研究的基础上,后续可进一步开展不同形状模具及工艺条件对RHT炸药凝固过程的影响,从而为其浇铸质量的控制提供参考和依据。

### 参考文献:

- [1] 田勇,刘石,周红萍,等. 炸药浇铸成型过程超声监测研究[J]. 含能材料,2008,16(1): 23-25.  
TIAN Yong, LIU Shi, ZHOU Hong-ping, et al. Ultrasonic monitoring in explosive cast process[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008,16(1): 23-25.

(下转 435 页)

mixtures of manganese sulfur [C] // Shock Compression of Condensed Matter, 2007.

- [7] 韩秀凤, 蔡瑞娇, 严楠. 雷管输出冲击波在有机玻璃中传播衰减的实验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(6): 329-332.

HAN Xiu-feng, CAI Rui-jiao, YAN Nan. Study on attenuation of detonator shock wave in PMMA [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 329-332.

- [8] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

## Attenuation Regularity of Detonation Wave of Small Charge in PMMA

XU Xin-chun<sup>1</sup>, JIAO Qing-jie<sup>1</sup>, CAO Xiong<sup>1,2</sup>, HU Shuang-qi<sup>2</sup>, ZHAO Hai-xia<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The output shock wave pressure attenuated by different thicknesses of PMMA gaps of booster JO with small size charge diameter was measured by manganin piezoresistance method. The exponential regularity of the shock wave attenuation coefficient versus the charge diameter in PMMA was obtained by fitting experimental data. The load density of the booster was 90% of the theoretical density, and the charge diameter was 1.5 mm, 3 mm, 5 mm and 8 mm with confinement of 45# steel and PMMA. Results show that the attenuation coefficient tends to decrease with the increasing of the charge diameter under the same confinement. The confinement of the charge is stronger, the change is more obvious.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; shock wave attenuation; small size charge; shock wave pressure; manganin piezoresistance method

(上接 430 页)

- [2] 周业明, 李莉, 胡志勇. 有限元模拟预测铸钢件的宏观缩孔缺陷 [J]. 铸造, 2003, 50(12): 743-745.

ZHOU Ye-ming, LI Li, HU Zhi-yong. Shrinkage defect in steel casting predicted by FEM software [J]. *Foundry*, 2003, 50(12): 743-745.

- [3] HOU Shu-ping, ZHAO Wei-min, REN Fu-zhan. Progress in the micro-modeling of the casting solidification process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123: 361-370.

- [4] ZHAO Hai-dong, Ohnaka Itsuo, ZHU Jin-dong. Modeling of mold filling of Al gravity casting and validation with X-ray in-situ observation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 32: 185-194.

- [5] 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*, 2003, A343: 290-300.

- [6] 黄亨建, 董海山, 张明. B 炸药的改性研究及其进展 [J]. 含能材料, 2001, 9(4): 183-186.

HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming. Problems and developments in composition B modification research [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2001, 9(4): 183-186.

- [7] 马兆敏, 沈炜良, 李文娟. 复杂铸件三维温度场有限元分析 [J]. 广西工学院学报, 2003, 14(1): 54-58.

MA Zhao-min, SHEN Wei-liang, LI Wen-juan. An analysis of finite elements in 3-dimension temperature field of complex castings [J]. *Journal of Guangxi University of Technology*, 2003, 14(1): 54-58.

## Numerical Simulation and Experimental Validation of RHT Solidification Process

LI Jing-ming, TIAN Yong, ZHANG Ming, GUO Peng-lin, ZHANG Wei-bin

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to understand the solidification process of casting explosive, the temperature fields of RHT explosive during solidification process were simulated by finite element method. The shrinkage of RHT explosive after solidification was also predicted. The results show that the temperature difference between inner and outer of RHT explosive during solidification process is quite great. There exists an inflexion on the temperature curves in the centre area. And the porosity will be presented on the middle position of solidified RHT explosive. On the other hand, the temperature of RHT explosive during solidification process was also tested by thermocouple and the interior quality was inspected by ICT, and the simulated results and tested results were also compared. The results show that the finite element method can be used to simulate the RHT explosive solidification process.

**Key words:** physical chemistry; RHT explosive; solidification; numerical simulation