

doi: 10.7690/bgzd.2013.09.012

## 熔铸炸药凝固过程内部温度和缺陷的数值仿真

贾宪振, 王晓峰, 王建灵

(西安近代化学研究所第二研究部, 西安 710065)

**摘要:** 为预估熔铸炸药凝固过程中装药内部温度场的变化和出现缺陷的位置, 采用有限元程序 ProCAST 对 RHT 炸药的凝固过程进行数值模拟。以熔铸炸药 RHT 的凝固过程为研究对象, 计算出装药内部的温度场分布, 预测装药内部形成缩孔和缩松的位置, 并与试验结果进行对比验证。结果表明: ProCAST 程序能够准确计算出熔铸炸药凝固时内部缺陷的位置, 可以用于炸药熔铸工艺的仿真设计。

**关键词:** 材料学; 熔铸炸药; 装药缺陷; 数值模拟; ProCAST

**中图分类号:** TJ510.5 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Temperature Field and Defects During The Solidification Process of Casting Explosive

Jia Xianzhen, Wang Xiaofeng, Wang Jianling

(No. 2 Research Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to studying the temperature field change and predicting the location of defect during casting explosive solidification process, the finite element program ProCAST was used to simulate the solidification process of the explosive RHT. Based on RHT solidification process, the interior temperature field distribution is calculated, and the locations of shrinkage cavity and shrinkage porosity are predicated. Then, validate it with test result. The results show that ProCAST program can precisely calculate the interior defect location, and it can be used for simulation design of casting explosive.

**Key words:** material science; casting explosive; charge defect; numerical simulation; ProCAST

### 0 引言

传统的炸药装药工艺设计主要是采用试验方法, 需要进行大量的装药工艺试验, 造成工艺设计的成本高、周期长。随着计算机硬件和数值仿真技术的发展, 采用数值仿真方法计算炸药的装药工艺过程已经成为现实。Dawi Sun 等人对 TNT 基和 RDX 基炸药的铸装工艺开展了数值模拟<sup>[1]</sup>, 李敬明等采用实验方法研究了 RHT 炸药的凝固过程<sup>[2-3]</sup>, 并利用 ANSYS 程序进行了数值仿真。

ProCAST 是为评价和优化铸造产品与铸造工艺而开发的专业有限元程序, 该程序在金属铸造领域应用很广泛<sup>[4-5]</sup>, 但是在炸药装药工艺领域的应用还较少。笔者采用 ProCAST 开展了熔铸装药工艺过程的数值模拟, 对装药内部温度场和装药缺陷的形成位置进行了预估, 并与试验结果进行了对比, 验证了数值仿真的准确性。

### 1 仿真模型建立

以文献[2]中熔铸炸药 RHT 的凝固过程为研究对象。RHT 炸药的药浆在铝制模具内凝固, 模具的

外部尺寸为  $\Phi 110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 内部尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 开始时 RHT 炸药的药浆充满整个模具。

有限元方法是将连续体进行离散, 以有限的离散单元来模拟无限的连续介质。为了保证计算精度, 离散单元的数量必须足够多; 同时, 实际的工程结构往往比较复杂。为了满足不同工程结构的网格划分要求, ProCAST 程序一般采用四面体网格。数值模拟所划分的网格如图 1 所示, 共约 510 000 个四面体单元。

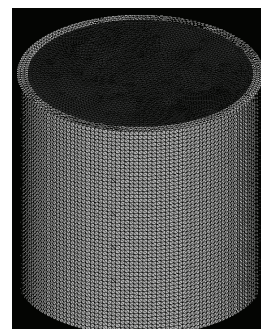


图 1 数值仿真划分的网格

对于数值仿真来说, 准确的仿真参数是保证仿真精度的关键。ProCAST 软件自身带有数据库<sup>[6]</sup>,

收稿日期: 2013-04-10; 修回日期: 2013-05-07

作者简介: 贾宪振(1982—), 男, 山东人, 博士, 高级工程师, 从事混合炸药性能和工艺研究。

主要包含常见的金属材料参数，不包含各类炸药的参数。但是，ProCAST 软件提供用户自定义数据库的功能，可以录入数据库中没有的材料参数。计算中需要的参数见表 1。表中， $\lambda$  表示导热系数， $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ； $\rho$  表示密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； $C_p$  表示比热， $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ； $L$  表示结晶潜热， $kJ \cdot kg^{-1}$ ； $T_m$  表示熔点， $^{\circ}C$ ； $\alpha$  为换热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； $T_f$  为环境温度， $^{\circ}C$ 。

表 1 数值仿真所需参数及其取值<sup>[2]</sup>

参数	炸药	模具	参数	炸药	模具
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.26	240	$T_m/^{\circ}C$	80	—
$\rho/kg \cdot m^{-3}$	1 710(25 $^{\circ}C$ ) 1 500(90 $^{\circ}C$ )	2 700	$\alpha/W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	10	10
$C_p/kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1.181	0.9	$T_f/^{\circ}C$	25	25
$L/kJ \cdot kg^{-1}$	37.5	—			

ProCAST 程序中设有专门的缩松缩孔计算模型<sup>[6]</sup>，该模型采用临界固相率法和补缩距离法相结合的方式预测缩孔缩松的形成，可以耦合模拟微观缩孔和宏观缩孔以及管状缩松。在该模型中采用缩孔形成的固相率准数 (Parameter for the macroporosity calculation, MACROFS)、缩管形成的固相率准数 (Parameter for the piping calculation, PIPEFS) 和临界补缩长度 (Feeding length, FEEDLEN) 这 3 个参数来控制缩孔和缩松的形成，程序默认 MACROFS=0.7 mm、PIPEFS=0.3 mm、FEEDLEN=5 mm，对于大多数工况来说，按照上述默认值计算即可满足仿真精度要求。

## 2 仿真结果和讨论

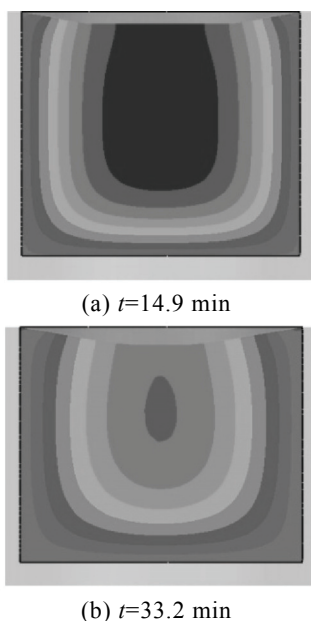


图 2 不同时刻的装药横截面温度梯度

计算时，以药浆充满模具作为零时刻计算，图 2 给出了不同时刻的装药横截面的温度梯度。可见

凝固是从外向内的过程，炸药外部首先凝固，温度较低，炸药内部的凝固时间较长，温度较高，从而形成了炸药内外的温度梯度。由于模具和炸药是轴对称，所以温度等温线也是轴对称<sup>[7]</sup>。根据表 1 可知，固态 RHT 炸药的密度比液态 RHT 炸药的密度大，因此随着药浆的凝固，炸药所占的体积逐渐减小，导致药浆的液面逐渐下降，中轴线上的液面最低。

图 3 是 38.2 min 时刻装药横截面上的固相率分布图，可见此时大部分药浆已经完全凝固，只有中心且靠近自由面的药浆尚未完全凝固。这些尚未凝固的部位也是可能形成缩孔和缩松的位置。

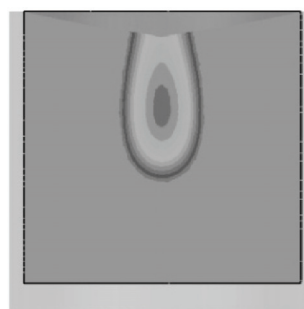


图 3 38.2 min 时的固相率分布

数值模拟当中，可以通过调整参数显示不同致密度要求下的缩孔和缩松分布。图 4 显示的是致密度达不到 90% 的区域，图 5 显示的是致密度达不到 50% 的区域。通过图 4 和图 5 可知，所设定的致密度越高，缩孔和缩松的范围越大，缩孔和缩松所在部位炸药的致密度分布是不均匀的，内部的致密度小，外部的致密度大。



图 4 致密度达不到 90% 的区域

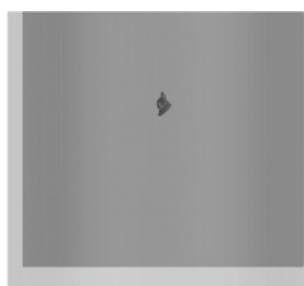


图 5 致密度达不到 50% 的区域