

文章编号:1006-9941(2008)06-0693-05

## PBX 药柱温升过程中的性能变化研究

兰琼<sup>1</sup>, 鲁建英<sup>2</sup>, 张明<sup>1</sup>, 雍炼<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

**摘要:**为全面了解温升过程中 PBX 药柱温度、应力和尺寸变化情况,利用瞬态-应力耦合有限元法对药柱温升过程进行模拟。结果显示:药柱温升过程中,热量逐渐向内部传递,初始升温阶段应力增大很快,最大达到 2.37 MPa,随着内外温差的减小而逐渐减小;药柱尺寸增大,密度减小约  $0.008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通过模拟可以初步确定药柱温升过程内部应力变化规律,预估尺寸和密度变化量,优化设计了一种炸药加热工艺,即将加热分四段进行,尽量降低升温速率,保证至少 1800 s 的恒温时间。

**关键词:**物理化学;高聚物粘结炸药(PBX);热处理;数值模拟

**中图分类号:**TJ55; O64

**文献标识码:**A

### 1 引言

炸药件压制成型后有一定的内应力存在,内应力的释放可能导致炸药件体积膨胀,形成微裂纹,甚至导致加工过程中炸药件破裂<sup>[1]</sup>,需要通过热处理来消除内应力。热处理过程中升温速率影响热应力大小,如果升温过快可能导致拉伸应力过大使炸药件内部局部界面脱粘或局部基体剪裂,甚至开裂<sup>[2-3]</sup>,但是,如果升温太慢又会延长实验周期。因此,需要研究成型炸药件在温升过程中的各项性能变化。但是,仅通过实验测试手段很难获得全面的数据,且效率较低。目前有限元数值模拟技术在金属热处理领域<sup>[4-6]</sup>已经得到广泛应用,开发出了 HEARTS<sup>[7]</sup>、NHST<sup>[8]</sup> 等热处理过程数值模拟软件包,实现了对淬火、回火、渗碳等过程的温度、组织、残余应力等的计算。但是,炸药是一种颗粒高度填充的特殊材料,与金属有很大区别,其后处理机理还在研究当中,要对其作用过程进行全面描述还很难。

本文利用有限元法对高聚物粘结炸药(PBX)药柱热处理过程升温阶段的温度分布情况进行计算,利用温度变化与应力应变关系得到药柱升温过程中的应力、尺寸变化规律,并与温度场在线测量实验结果进行对比,修正模型参数,得到适合模拟 PBX 药柱温升过程的通用热分析模型,由此对加热工艺进行优化。

### 2 温度场问题

#### 2.1 温度场在线测量实验

等静压制  $\Phi 56 \text{ mm} \times 154 \text{ mm}$  温度场试验件一发,

内置铜-康铜测温热电偶,将热电偶接至数据采集器,置于烘箱中加热,记录温度随时间变化规律,为数值模拟提供热载荷数据及模型修正依据。炸药件摆放位置及接线如图 1 所示,药柱中排布 1、2 两根测温热电偶,分别测试内、外温度变化,热电偶分布如图 2 所示。药柱初始温度为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,预定加热温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。烘箱升温 7560 s 至预定温度,恒温 1800 s 后,药柱 1、2 点温度均达到  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 2.2 问题的描述

升温过程中药柱内部温度低于载荷温度,存在温度差,产生热应力,热量以热传导方式从药柱表面向内部传递,温度与时间有关;同时,加热使药柱膨胀,产生弹塑性变形。采用瞬态热-应力耦合有限元法,选用 SOLID5 八节点六面体单元模拟  $\Phi 56 \text{ mm} \times 154 \text{ mm}$  PBX 药柱在随时间变化的热载荷输入条件下的内部温度、等效应力及尺寸变化情况。

#### 2.3 问题的假设

(1) 温度场问题为无内热源热传导问题。(2) 药柱温升过程中吸收热量,发生弹性变形。(3) 材料为均质各向同性。(4) 与温度有关的力学性能在微小时间增量内呈线性变化,弹性应变、温度应变可分。(5) 药柱导热系数、比热不随温度变化。

### 3 有限元模型的建立

#### 3.1 几何模型

根据药柱的几何对称性,取其中心点为坐标原点,取  $\theta_1 = 0^\circ$  和  $\theta_2 = 90^\circ$ ,  $Z_1 = 0 \text{ mm}$  和  $Z_2 = 77 \text{ mm}$  及  $r = 28 \text{ mm}$  的截面为边界,将几何模型简化为 1/8 圆柱体,如图 2b 所示。取 1、2 点为温度采集点, I、II、III 点为应力采集点, a 点(图 2)为位移采集点。

收稿日期:2008-02-28;修回日期:2008-07-23

作者简介:兰琼(1979-),女,硕士,主要从事含能材料成型及相关技术研究。e-mail:lanqiong111@sohu.com

3.2 材料模型

温升导致药柱体积膨胀,产生拉伸应力应变,不同温度下,材料的软化程度不同,其拉伸强度和拉伸模量也不同,强度和模量的变化对温升过程应力应变有很大的影响。表1为药柱在不同温度下的拉伸强度和拉伸模量<sup>[9]</sup>,表2为模拟用到的其他材料参数<sup>[10]</sup>。

3.3 约束条件

由于将药柱进行了简化,需要对内部边界  $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 90^\circ$ 、 $Z_1 = 0$  mm 的三个面施加对称约束。

3.4 热传导方程

由于药柱和对其施加的约束及载荷都是轴对称的,可以采用轴对称温度场进行分析<sup>[11]</sup>。取柱坐标下轴对称问题一小单元进行分析,如图3所示。

表1 PBX药柱在不同温度下的拉伸强度及模量

Table 1 The tensile strength and modulus of PBX cylinder at different temperatures

temperature / °C	tensile strength / MPa	tensile modulus / GPa
20	6.62	11.61
35	6.12	11.79
45	5.74	10.64
55	4.65	7.53
60	3.43	5.33

表2 PBX药柱材料参数

Table 2 The material parameters of PBX cylinder

$\nu$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\kappa/w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$C/kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$a/K^{-1}$
0.3	1.845	0.302	1.02	$5.48/10^{-5}$

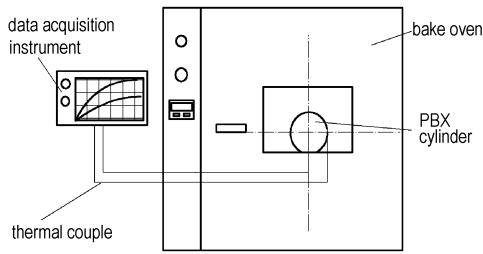


图1 实验接线图  
Fig. 1 Diagram of wiring

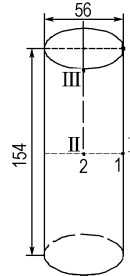


图2 药柱示意图及其简化模型  
Fig. 2 Schematic and simplified model for PBX cylinder

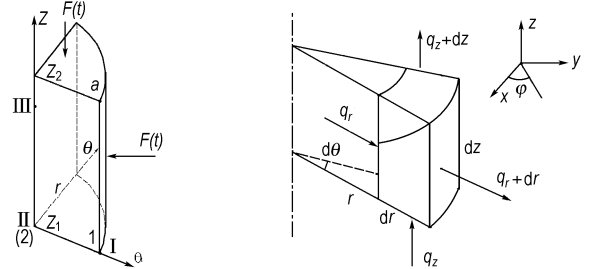


图3 有限单元模型  
Fig. 3 Model of finite element

三维轴对称无内热源瞬态温度场的导热偏微分方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\kappa r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\frac{\kappa}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\kappa \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $T$  为药柱温度,  $\kappa$  为材料导热系数,  $C$  为材料比热,  $\rho$  为药柱的密度,  $t$  为升温时间;  $r$  为药柱半径,  $z$  为对称轴高度,  $\varphi$  为柱坐标方位角。

3.5 应力-应变方程

对于热弹性问题,单元总应变:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{th} \quad (2)$$

式中,  $\dot{\epsilon}_e$  为弹性应变,  $\dot{\epsilon}_{th}$  为热应变。因热膨胀是各向同性的,故有:

$$\dot{\epsilon}_{th} = [\alpha \Delta \dot{T}, \alpha \Delta \dot{T}, \alpha \Delta \dot{T}, 0, 0, 0]^T \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\Delta \dot{T}$  为在一次计算步内单元平均温度变化量。单元总应力为:

$$\dot{\sigma} = [D_e] (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_0) \quad (4)$$

式中,  $[D_e]$  为弹性矩阵,  $\dot{\epsilon}_0$  为初应变,假设为零。

3.6 初始条件

为便于与实验结果对比,假定药柱初始温度分布

均匀,且与实验值相同,即  $T_0 = 15^\circ C$ ; 加热前药柱内部无初始应力应变,即  $\sigma_0 = 0, \epsilon_0 = 0$ 。

3.7 边界条件

药柱加热边界温度即为烘箱内环境温度,热分析模型以实际测量的升温曲线经 origin 软件拟和得到热载荷曲线1,将其作为面载荷均匀施加于顶面 ( $Z_2 = 77$  mm) 和侧面 ( $r = 28$  mm) 节点上。以与时间有关的温度函数  $F(t)$  表示,如图4所示。

$$F(t) = 14.43877 + 0.0262t - 3.64479 \times 10^{-6}t^2 + 2.00024 \times 10^{-10}t^3 - 2.82197 \times 10^{-15}t^4 \quad (5)$$

( $t = 0 \sim 9360$  s)

4 结果与讨论

4.1 温度变化结果及讨论

模拟与实验药柱尺寸、材料参数、热载荷相同,温度变化如图5所示。从图5可以看出,药柱升温过程中,实验和模拟的1点温度都高于2点温度,说明边界温度始终比内部高,热传递首先由外部开始,逐步传入内部,进入恒温阶段后,实验温度逐渐接近模拟温度,

最终均能达到预定温度。

实验测量温度低于模拟温度,是因为药柱升温过程中采用丁腈橡胶包覆,其边界实际温度在升温阶段始终低于环境温度,且模拟计算的部分假设及材料参数值也会对结果产生一定的影响。

将升温过程模拟与实验结果对比表明:模拟结果与实验结果基本相符,可以通过模拟初步确定成型药柱升温条件及达到预定温度的时间。以上热分析模型可以用于对药柱温升过程进行模拟。

### 4.2 应力分析结果及讨论

药柱升温初期(120 s)、应力最大(1440 s)及恒温结束时应力分布如图 6 所示,药柱外部(I)、中心(II)和内部(III)应力变化如图 7 所示。

从图 6 可以看出,药柱内部靠近顶部 Z<sub>2</sub>/8(III)点附近始终为最低应力区,而应力最大值出现在侧面中部(I)点附近,顶面和侧面应力始终高于内部应力,是最有可能产生缺陷的地方。从图 7 可以看出,升温初期应力迅速增大,在 1000~2000 s 之间各节点应力相继达到最大值,随着热量逐步向内传递,应力逐渐减小,恒温后内外应力差减小更快,加热结束时 I、II 和 III 点残余热应力分别为 0.068, 0.020, 0.0033 MPa。可见,药柱在升温阶段结束后,保持恒温一段时间,有利于消除热应力。

在 1440 s 附近,侧面 I 点应力达到最大值 2.37 MPa,此时环境温度为 39 °C,这时的材料拉伸强度在 5.74~6.12 MPa 之间,温升导致的最大热应力值低于材料的拉伸强度极限值,因此,在加热过程中,药柱不会断裂。但是,如果升温速率太快,导致温度梯度过大,也有可能产生较大的热应力,这将会对内部质量产生很大的影响。

### 4.3 变形分析结果及讨论

由药柱升温结束时的总位移向量分布图 8 可见,药柱顶部外圆周部分总位移变化最大,即形变最大,中心部分形变最小,说明药柱经长时间加热后会有一定的变形,整体膨胀,顶部圆周部分膨胀略大于中部,但因其形变很小,肉眼很难察觉。

从药柱升温过程 a 点轴向及径向位移变化图 9 可见,药柱尺寸随温度升高逐渐增大,且轴向变化大于径向变化,轴向最大位移 0.0927 mm,径向最大位移 0.0417 mm。

通过模拟可以看出,加热会导致药柱尺寸长大,因其质量不变,必然会导致药柱密度减小,这与实际热处理后结果相同<sup>[12]</sup>。本例已知加热前药柱初始密度为 1.845 g·cm<sup>-3</sup>,则由公式  $m = \rho_0 V_0 = \rho_1 V_1$  计算,得到加热 9360s 后药柱密度为 1.837 g·cm<sup>-3</sup>,密度减小量为 0.008 g·cm<sup>-3</sup>。

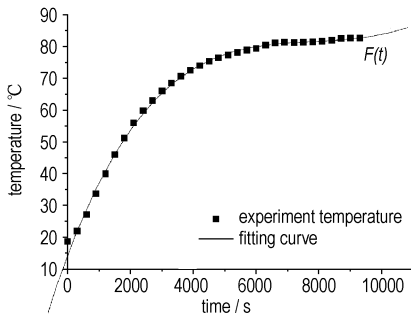


图 4 药柱热载荷曲线 1

Fig. 4 Thermal load curves of PBX cylinder

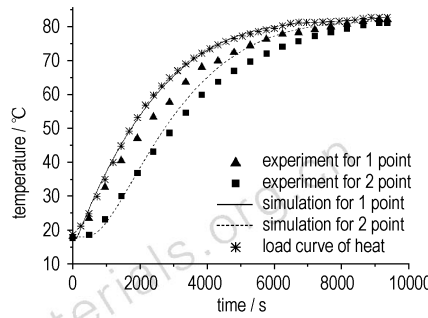


图 5 模拟与实验温度对比图

Fig. 5 Comparison of temperature of simulation and experiment

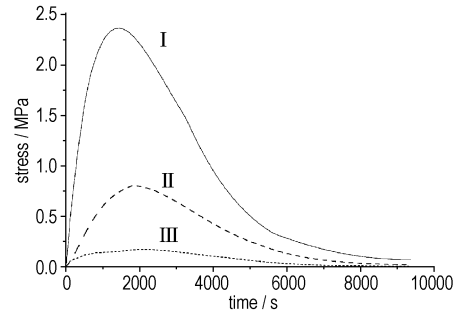


图 7 药柱(载荷 1)升温过程应力变化图

Fig. 7 Curves of stress vs heating time

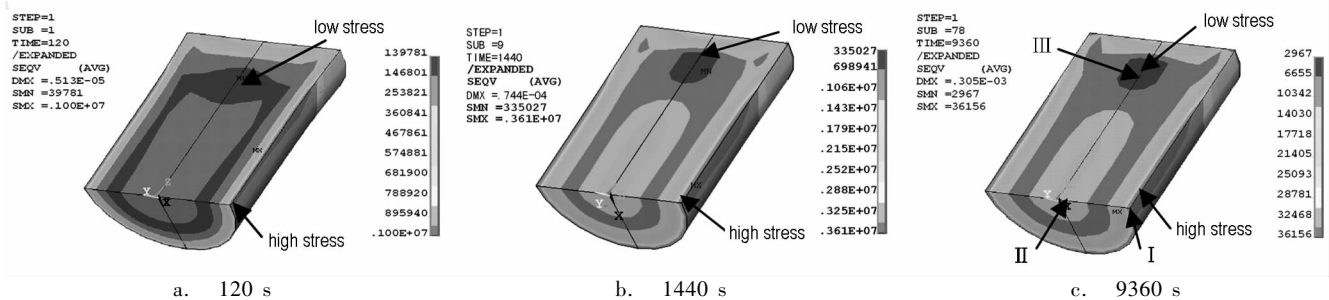


图 6 药柱不同升温时间的应力分布图

Fig. 6 Stress profiles at different temperature rising time

### 5 应力变化影响因素分析及工艺条件的优化

#### 5.1 应力变化影响因素分析

将热载荷曲线1的升温速率图10和药柱预热过程中内外(1,2点)温差图11与应力变化图7对比发现,药柱应力受升温速率影响,初始升温速率增加很快,最大为0.022℃/s,使得单位时间内内外温差很快拉大,导致应力迅速升至最大值,之后随升温速率减小,单位时间温差减小,应力也逐渐减小,恒温阶段残余应力减小到很低的水平。

#### 5.2 预热工艺条件的优化

由以上分析可知,可以通过控制升温速率来控制应力变化。为了比较改进前后升温条件对应力变化的影响,以热载荷曲线1的加热总时间(9360s)、初始温度(15℃)、恒温温度(80℃)为标准,以减小加热过程中内外温度差、降低最大应力和残余应力,并兼顾实验的可操作性为原则,对预热工艺条件进行优化,设计了热载荷2。加热分四段进行:0~1800s升温10℃,升温速率为0.0056℃/s;1800~6000s升温35℃,升温速率为0.0083℃/s;6000~8200s升温20℃,升温速率为0.0091℃/s;8200~9360s为恒温阶段。

将热载荷2输入热分析模型得到如图12所示的应力变化曲线。载荷2将加热平均分布到各个阶段,

其最大升温速率较载荷1减小很多,且升温速率逐渐升高。从图12看出,I点应力在2280s时达最大值1.62MPa,与图7结果比较,应力达最大值时间延迟了840s,加热初期应力变化有所减缓,且各点应力值有很大的减小,这利于减小对加热过程中药柱质量的不良影响。但由于延长了升温时间,使恒温时间(1160s)较载荷1(1800s)短,导致加热结束时I、II和III点残余热应力值略有增加,分别为0.077,0.052,0.013MPa。

为解决以上问题,在载荷2的基础上设计了热载荷3,将预热总时间延长到4h(14400s),仍分四段进行:0~2600s升温10℃,升温速率为0.0038℃/s;2600~9000s升温35℃,升温速率为0.0055℃/s;9000~12600s升温20℃,升温速率为0.0056℃/s;12600~14400s为恒温阶段。载荷3与载荷2相比升温速率又有所减小,恒温时间延长到了1800s。

图13为模拟得到的载荷3三点应力变化图,与图12相似,虽然加热初期应力增加相对整个加热过程快,但I点应力在2880s时达到最大值0.99MPa,最大应力值不超过1MPa,各点应力值又有所减小,加热初期应力增幅进一步减缓,温升过程对药柱的热冲击进一步减小。加热结束时三点残余应力相对第二种载荷方式也有所减小,分别为0.044,0.032,0.0099MPa。

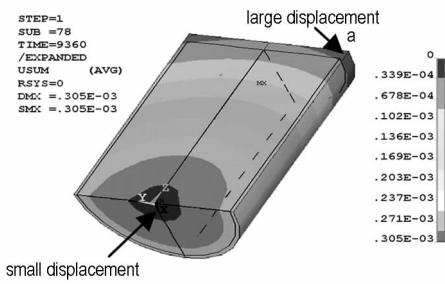


图8 药柱升温9360s时的位移分布图  
Fig.8 Profile of displacement at 9360 s

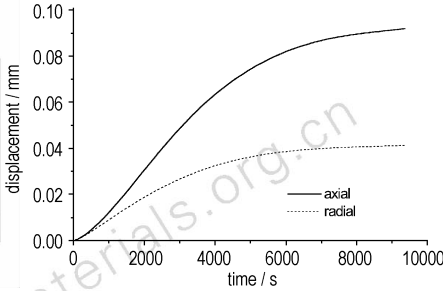


图9 药柱升温过程位移变化图  
Fig.9 Curves of displacement vs. heating time

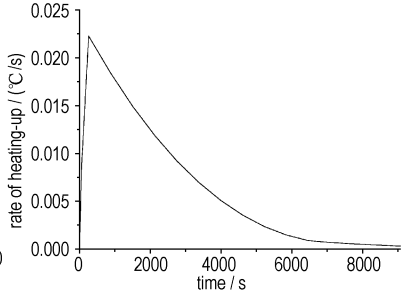


图10 热载荷1升温速率曲线  
Fig.10 Heating-up rate curve of thermal load 1

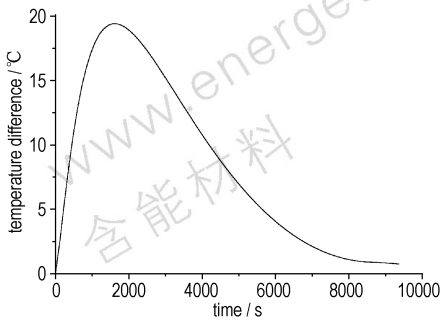


图11 药柱内外温差曲线  
Fig.11 Temperature difference curve of thermal load 1

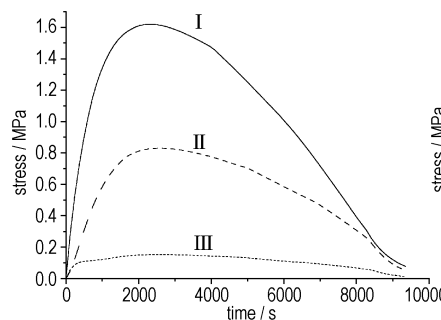


图12 药柱(载荷2)升温过程应力变化图  
Fig.12 Curves of stress vs heating time

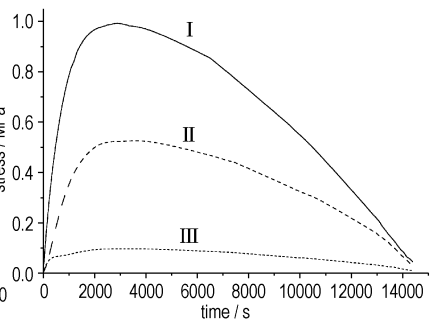


图13 药柱(载荷3)升温过程应力变化图  
Fig.13 Curves of stress vs heating time

模拟结果说明,改进后的预热工艺不但能使药柱在短时间内达到预定温度,减小热冲击,还能使残余应力保持在较低的水平。

以上分析说明,可以通过模拟设计药柱的升温条件,其关键是在实验条件允许的情况下,严格控制升温速率,并保证合适的恒温时间。

## 6 结 论

通过对比修正 PBX 药柱温升过程的实验及模拟结果,确定了一套通用的热分析模型。模拟结果表明:随着温度的升高,热量逐渐向药柱内部传递;药柱尺寸略有增大,由此估算温升引起的密度变化量为  $0.008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;应力在初始升温阶段增大很快,随着升温速率的减小逐渐减小。

应用热分析模型,通过对热载荷 1 的优化设计了一条较为合理的升温工艺,即将加热分四段进行,尽量降低升温速率,保证至少 1800 s 的恒温时间。模拟结果表明,加热结束时,药柱在达到预定温度的同时,应力增幅减缓,最大应力值低于 1 MPa,残余应力值较小。

### 参考文献:

- [1] 陈鹏万, 丁雁生, 陈力. 含能材料装药的损伤及力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 212-222.  
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng, CHEN Li. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(2): 212-222.
- [2] 张伟斌, 田勇, 温茂萍, 等. JOB-9003 炸药热冲击损伤的超声波检测[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 85-88.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, WEN Mao-ping, et al. Experimental study on the thermal shock damage of explosive by ultrasonic testing [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(2): 85-88.
- [3] 田勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 174-177.  
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 174-177.
- [4] JANG J W, PARK I W, KIM K H, et al. FE Program Development for Predicting Thermal Deformation in Heat Treatment[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, 130(3): 546-550.
- [5] PAN J, LI Y, LI D. The Application of Computer Simulation in Heat-treatment Process of a Large-scale Bearing Roller[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, 122(2): 241-248.
- [6] 潘健生, 张伟民, 田东, 等. 热处理数学模型与计算机模拟[J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 47-54.  
PAN Jian-sheng, ZHANG Wei-ming, TIAN Dong, et al. Mathematical model of heat treatment and its computer simulation[J]. *Engineering Science*, 2003, 5(5): 47-54.
- [7] Inoue T, Arimoto K. Development and Implementation of CAE System "HEART" for Heat Treatment Simulation Based on Metallo-thermo-mechanics[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1970, 12(4): 349-370.
- [8] 吴景之. 温度场计算机模拟在国内大锻件生产中的应用[J]. 大型铸锻件, 1993(2): 64-66.
- [9] 温茂萍, 庞海燕, 敬仕明, 等. 等静压与模压 JOB-9003 炸药力学性能比较研究[J]. 含能材料, 2004, 12(6): 338-341.  
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, JING Shi-ming. Comparative study on mechanical properties of two kinds of JOB-9003 shaped separately by isostatic liquid pressing and mould pressing[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 338-341.
- [10] 董海山. 炸药及相关物理性能[M]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005: 428-433.
- [11] 荣先成. 有限元法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 145-147.
- [12] 李敬明, 温茂萍, 黄毅民. 热循环对 TATB 基高聚物粘结炸药性能的影响研究[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 208-210.  
Li Jing-ming, WEN Mao-ping, HUANG Yi-ming. Effect of thermal cycling test on the properties of TATB based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(4): 208-210.

## Properties for PBX Cylinder during Temperature Rising

LAN Qiong<sup>1</sup>, LU Jian-ying<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, YONG Lian<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Finite element numerical simulation based on transient thermal-stress coupled analyses was conducted to understand the temperature, stress and dimensions for PBX cylinder during temperature rising. Results show that with temperature rising, heat transfers from surface to inner; stress augments rapidly at beginning, even arrives to 2.37 MPa, then reduces with temperature difference decreasing, the size of PBX cylinder is grown and its density is decreased by about  $0.008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Numerical simulation can preliminary determine the regularity of stress distribution. And heating process has been optimized to try to decrease the rate of temperature rising and ensure at least 1800 s temperature-constant time.

**Key words:** physical chemistry; polymer-bonded explosive (PBX); heat treatment; numerical simulation