

文章编号: 1006-9941(2015)03-0232-06

一种浇注 PBX 固化过程的实验与数值模拟

张百磊, 常双君, 袁俊明, 欧亚鹏

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为研究浇注高聚物粘结炸药(PBX)固化工艺过程中温度场和应力场的变化规律,用布拉格(Bragg)光栅在 60 °C 下测试了其固化过程的温度场。采用有限单元法进行了其固化工艺过程温度场和不同换热系数条件下的应力场的数值模拟。结果表明:固化前期药柱温度高于 60 °C。其中心部位温度可达 65 °C。温度由中心部位到模具内壁呈递减趋势。温度梯度在 3.88×10^{-5} s 时最大。应力集中区域主要分布在药柱下半部分。随着模具和药柱之间换热系数的增大,有效应力集中面积和最大有效应力相应增加。当换热系数为 $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时药柱在 3.88×10^{-5} s 有效应力集中区域最大,最大有效应力为 6.69 kPa。

关键词: 浇注高聚物粘结炸药(PBX); 固化工艺; 布拉格(Bragg)光栅; 数值模拟

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.006

随着炸药新材料的不断应用及炸药配方与工艺的优化和发展,浇注高聚物粘结炸药(PBX)由于其高能量、低感度和高安全性等多种优点,正在被越来越广泛地应用在高技术武器系统中^[1-2]。

在浇注和固化过程中由于工艺条件不当会导致成型药柱内部热应力和气孔的出现,因此需要对炸药传统固化工艺进行优化,但此方面的研究主要靠反复实验的方法,周期较长且缺乏科学理论指导。近年来凝固过程的数值模拟由金属材料推广至含能材料领域,国内专家学者已经对熔铸类炸药凝固过程的数值模拟进行了大量的探索和研究,李敬明等^[3]用 ProCAST 软件对熔黑梯(RHT)炸药凝固过程建立了数学模型并进行了计算,结果表明,该软件适合模拟炸药的凝固过程。马松等^[4]通过水浴和自然条件下熔铸炸药凝固过程的数值计算,得出水浴条件下熔铸炸药质量更好。黄勇^[5]通过对熔铸炸药浇注过程进行数值模拟,发现浇注系统与环境间的换热对凝固过程有着决定性的作用,特别是冒口部分,如果换热系数过大,根本起不到保温补缩的作用;另外加压能显著减少缩松缺陷。马松等^[6]对 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)炸药凝固过程

进行了实验与数值模拟,结果表明, DNAN 在 96 °C 附近出现温度滞后现象,中心部位最明显,凝固后最大孔隙率可达 0.38。然而关于浇注 PBX 固化工艺过程的数值模拟在国内外报道较少,而浇注 PBX 的固化过程和熔铸炸药的凝固过程又有着本质的区别:前者主要是靠发生化学交联反应放出热量完成,后者是一个物理降温过程。基于此在数值模拟过程中考虑化学反应的放热量,完成对浇注 PBX 固化技术中实现计算机模拟与仿真,将对提高该炸药的质量和确保工艺安全性起到重要作用。

本研究对浇注 PBX 固化过程中温度场和应力场进行了数值模拟,得出了温度场和应力场的变化规律,并与实验测试结果对比,以期对浇注 PBX 固化工艺参数的优化、方案的改进等提供参考。

2 实验部分

2.1 实验装置

FBG-3000 型干涉解调仪;多点分布式 Bragg 光栅组,3 根光栅之间距离 24 mm,每根光栅上的测试点间距 60 mm,测试点 3、6、9 距离模具内底部 60 mm,测试点 1、4、7 距离上表面 60 mm,测试点 2、5、8 距离上下测试点均为 60 mm。实验前对光栅进行标定;模具尺寸为 $\Phi 110 \text{ mm} \times 245 \text{ mm}$,壁厚 5 mm;AHX-8 型水浴烘箱。系统原理示意图如图 1 所示。

2.2 实验原理

浇注 PBX 的固化原理一般认为^[7]是浇注 PBX 粘结

收稿日期: 2014-07-27; 修回日期: 2014-10-13

基金项目: 086 火炸药专项资助项目

作者简介: 张百磊(1988-)男,硕士研究生,主要从事低易损性炸药的研究。e-mail: zbl6525102@126.com

通信联系人: 常双君(1968-)女,教授,主要从事低易损性炸药配方设计及成型工艺研究。e-mail: junchsh@163.com

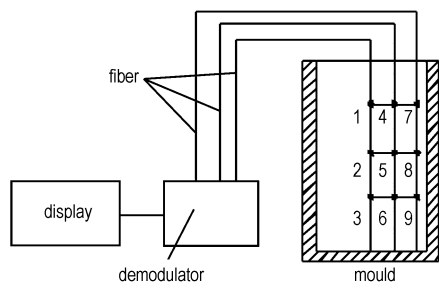
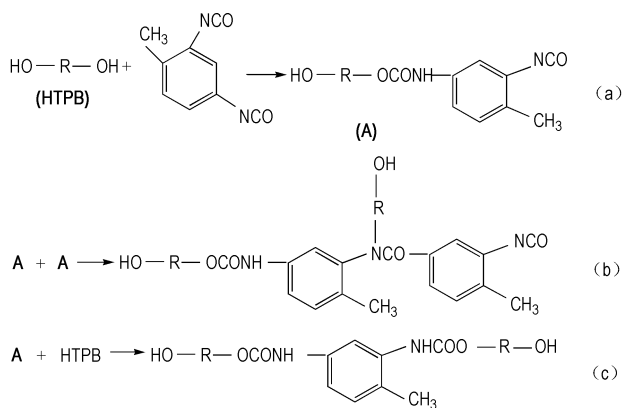


图 1 Bragg 光栅测量炸药温度原理图

Fig. 1 Principal diagram of measuring the temperature of explosive by Bragg grating

剂体系的反应,即羟基与异氰酸酯基反应生成氨基甲酸酯。反应机理如式(a)、(b)、(c)。



测量温度前需要将 Bragg 光栅固定在模具中,其测量温度的基本原理^[8]是:通过外界温度微小的变化引起光栅折射率的改变,从而引起光栅的 Bragg 波长产生微小的移位,通过测量 Bragg 波长的变化,利用其反射波长与温度之间的线性关系,经过标定,实时显示温度。实验采用 FBG-3000 型干涉解调仪,实现 Bragg 光栅波长的测量。

2.3 实验过程

本研究采用的浇注 PBX 配方为 64% RDX、20% Al 和 16% 粘结剂体系。浇注 PBX 采用捏合-浇注-加热固化技术制备,将 3 根光栅按图 1 所示位置固定在模具中,在加热保温条件下将药浆浇注到模具内,放入水浴烘箱在 60 °C 加热固化,开启 FBG-3000 型干涉解调仪实时记录药柱温度的变化,温度采集时间间隔设置为 600 s,在药柱温度降到 60 °C 稳定后,关闭烘箱,当药柱冷却至室温(约 25 °C)后停止实验。

3 数值模拟

3.1 模型建立

由图 1 可得模拟对象是圆柱型固化系统,其具有

旋转对称的特点,故在前处理软件 PRO/E 中建立 1/4 模型,再导入 ProCAST 进行网格划分,总节点数 8058,总单元数 36800,如图 2 所示。

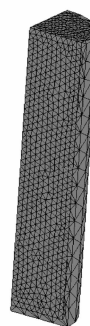


图 2 药柱固化模型

Fig. 2 Grain curing model

3.2 温度场求解设置

采用有限单元法^[9-10]对浇注 PBX 的固化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^[11],其数值计算依据瞬态传热偏微分方程,如(1)式所示。由浇注 PBX 的固化原理可知,该模拟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 α 已知,如(2)式所示。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^[12-13]。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

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

式中,方程(1)左边表示热积蓄项;右边第一、二、三项表示导热项;第四项为材料内部热源强度;其中 k 为炸药导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; c_p 为比热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; Q 为炸药内部热源强度, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; 式(2)中, T_f 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 浇注 PBX 及模具的性能参数

Table 1 Property parameters of cast PBX and steel mould

items	k / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	c_p / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
explosive	0.30	1.30	1656
mould	43.53	0.48	7850

浇注之前要对模具进行预热,所以模具和药浆的初始温度都设为 60 °C。浇注 PBX 的固化过程会发生交联反应而放出热量,该热量即为式(1)中的 Q 。该反应热的计算是多英全等^[14]以 Van Krevelen 和

Chermin 等人的基团估算方法及数据为基础, 结合高分子内聚能的概念, 由(3)式得出:

$$\Delta H_f^0(\text{凝聚态 TPU}) = \Delta H_f^0(\text{假象气态 TPU}) - E_{\text{coh}}^{\text{TPU}} \quad (3)$$

参照聚氨酯类弹性体(TPU)结构单元的形式及 Van Krevelen 和 Chermin 的数据, 可得到 1 mol TPU 结构单元为假想气态时的生成焓与硬段含量 H (即固化剂的含量) 之间具有表达式(4):

$$\Delta H_f^0 = \Delta H_{f,A}^0 + \Delta H_{f,B}^0 + \Delta H_{f,C}^0 = -\frac{11.92}{(1-H)} - 4.62 \quad (4)$$

依据 TPU 结构可将其分为 3 个部分: 其中, A 代表硬段的结构单元, 该结构单元是由异氰酸酯基和羟基之间发生反应生成的络合物; A 与 B 构成硬段, B 代表固化剂, 即该硬段是由上述络合物和固化剂发生反应生成的另一种络合物; C 为软段部分, 代表粘结剂的结构单元。

同理, 可得 1 mol TPU 结构单元中硬段与软段内能总和与硬段含量 H 之间可表示如下:

$$E_{\text{coh}}^{\text{TPU}} = E_{\text{coh}}^A + E_{\text{coh}}^B + E_{\text{coh}}^C = \frac{9.01}{(1-H)} - 0.011 \quad (5)$$

根据式(3)进行修正, 最终可得 1 mol 凝聚态 TPU 结构单元的生成焓与硬段含量 H 之间关系为:

$$\Delta H_f^0(\text{凝聚态 TPU}) = -\frac{9.01}{(1-H)} - 4.61 \quad (6)$$

由式(6)得到 1 mol 不同硬段含量的 TPU 结构单元的生成焓。实验中 $H=0.5$, 故得到 $\Delta H_f^0(\text{凝聚态 TPU}) = -22.63 \text{ MJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

3.3 应力场求解设置

热应力数值模拟是通过药柱固化过程中温度场与热应力场的耦合计算来得到应力场模拟结果。应力场计算模型包括线弹性模型, 弹塑性模型及粘弹塑性模型等^[15], 考虑到浇注 PBX 的力学性能, 模拟采用弹塑性双线性硬化模型对其成型过程中的应力场进行计算, 图 3 给出了该模型的应力应变曲线示意图^[15]。随

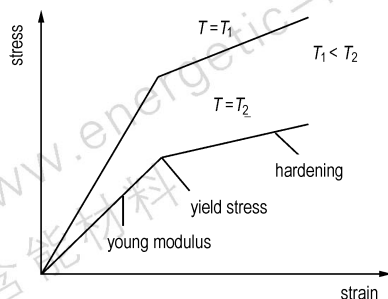


图 3 弹塑性双线性硬化模型^[15]

Fig. 3 Model of elastic-plastic bilinear hardening^[15]

着应力的增大, 模型由弹性模量计算转为了硬度计算, 其转折点是屈服应力。应变也随着温度 T 的升高而增大。由于炸药浇注成型时采用金属模具, 其模量和强度均远大于炸药的模量和强度, 且浇注温度 (60°C) 比金属的熔点低, 因此在进行应力场计算时将金属简化为刚性模型。表 2 给出了应力场计算所需参数^[9,16-17]。

表 2 应力场计算所需性能参数

Table 2 Property parameters needed in calculation of the stress fields

items	α / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	E /MPa	σ /MPa	ν
explosive	12	7.60 ($T=23^\circ\text{C}$)	12 ($T=25^\circ\text{C}$)	0.50
	10	7.18 ($T=40^\circ\text{C}$)	9 ($T=40^\circ\text{C}$)	
	8	6.10 ($T=60^\circ\text{C}$)	3 ($T=60^\circ\text{C}$)	
mould	-	-	-	

Note: E is elastic modulus, σ is yield stress, ν is Poisson's ratio. α is coefficient of heat transfer.

模具选用刚性模具, 所以相对炸药来说模具的 E 、 σ 、 ν 都没有数值, 但是其换热系数 α 是需要设置的。模拟中的换热系数 α 表征的是药柱与模具之间传热的快慢, 实际生产中模具的材料、厚度及有无绝热层等因素都会影响到换热系数。实验中模具的换热系数为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 故本模拟换热系数分别取 8, 10, $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 进行计算。

4 计算结果与讨论

4.1 温度场数值模拟结果及实验验证

依据 1/4 模型的建立和参数的设置, 在 $3.88 \times 10^5 \text{ s}$ 药柱进入降温阶段, 药柱内部的温度梯度最大, 该时间点药柱内部的温度分布, 如图 4 所示。由于药柱的热导率数值 (热导率表征热量在一种材料中的导热速

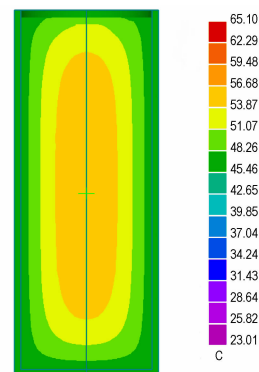


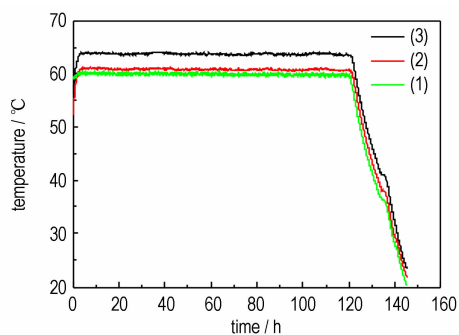
图 4 $3.88 \times 10^5 \text{ s}$ 时药柱的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution in grain at $3.88 \times 10^5 \text{ s}$

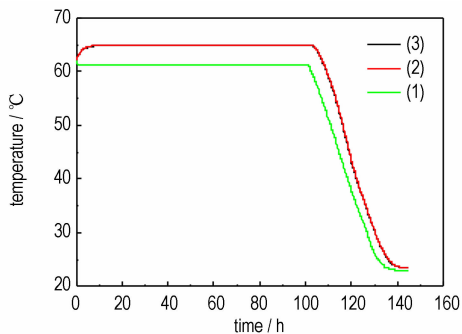
率)很小,所以温度在药柱内部的分布由中心向外跨度较大。另外药柱冷却过程放热相对较少,所以该过程也可被认为是由中心向外部传热降温的过程。图 5、6、7 分别给出了第 1、2、3、4、5、6、7、8、9 点温度变化曲线的数值模拟结果和实验测试结果,即每根光栅所在药柱位置纵轴方向上的温度分布。

从图 5 ~ 图 7 可见,浇注 PBX 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。由于浇注 PBX 在固化过程中会发生反应放出热量,故所有的测试点都会出现一段温度维持在 60 °C 以上的时间平台,最高可达 65 °C;大约 96 h 后固化反应结束,体系热量失衡开始降温。当药柱温度降到 60 °C 稳定后,关闭烘箱,整个体系自然降温。其中 7、8、9 三个测试点因离模具内壁较近,向外部环境传热相对较快,所以这三个点所在光栅上测得的温度会比其它两个光栅上测得的温度低。同理 4、5、6 三个点所在光栅上测得的温度会比 1、2、3 点所在光栅上测得的温度低。

另外由图 5 ~ 图 7 可分别观察到,药柱内部纵向温差较大,可能是由于测试条件及方法的限制,所以在后续的研究中可以通过在模具内壁增加一层绝热层或者改变模具材料及厚度来降低温差。



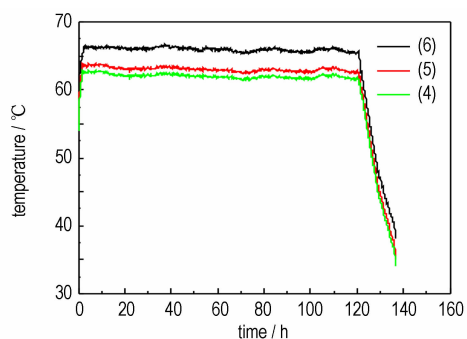
a. tested curves



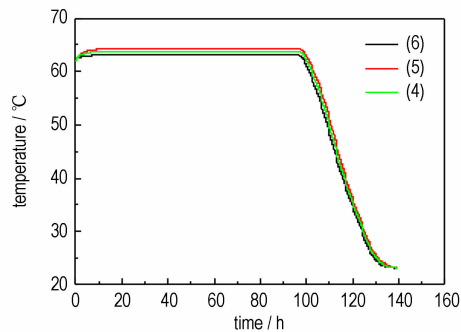
b. simulated curves

图 5 第 1、2、3 点温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curves of points 1, 2, 3



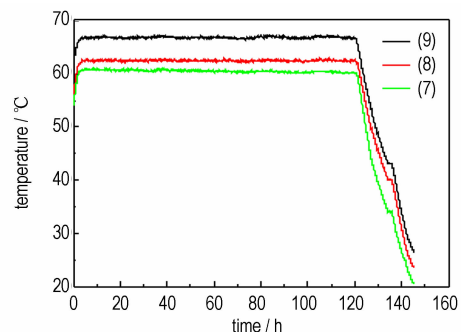
a. tested curves



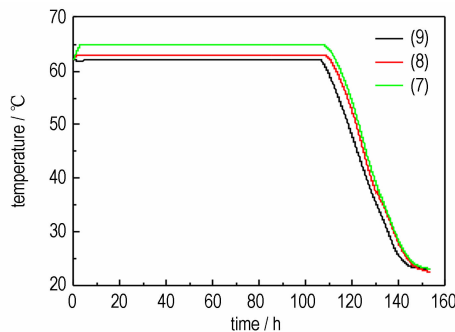
b. simulated curves

图 6 第 4、5、6 点温度变化曲线

Fig.6 Temperature change curves of points 4, 5, 6



a. tested curves



b. simulated curves

图 7 第 7、8、9 点温度变化曲线

Fig.7 Temperature change curves of points 7, 8, 9

4.2 应力场数值模拟结果

依据设置的3种换热系数 $8, 10, 12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 计算得到药柱在 $3.88 \times 10^5 \text{ s}$ 有效应力分布如图8所示。应力集中区域主要分布在药柱下半部分, 随着换热系数的增加, 药柱内部应力集中的区域及最大有效应力也随之增大。这是因为随着换热系数的增大, 药柱通过模具向外界环境传递出热量的速度就会相应加快, 导致药柱内部温度梯度过大, 从而影响到药柱内部的应力分布。3种换热系数下的最大有效应力见表3。

表3 浇注PBX在3种换热系数下的最大有效应力

Table 3 Maximum effective stress of cast PBX under three kinds of heat transfer coefficient

$\alpha / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	8	10	12
maximum effective stress/kPa	1.95	5.66	6.69

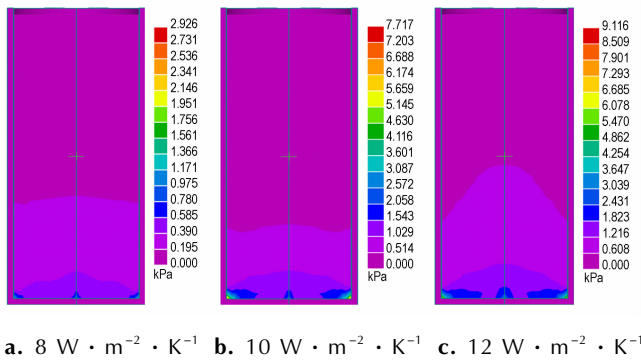


图8 浇注PBX在不同换热系数下的有效应力分布

Fig.8 Effective stress distribution of cast PBX under different heat transfer coefficient

实验采用的浇注类PBX的屈服应力^[18]是0.06 GPa, 所以药柱内部不会因为应力集中的原因而出现热裂痕。但是药柱内部应力场会随着炸药的配方、环境温度的变化率、模具材料及厚度等因素的变化而变化, 例如在药柱冷却阶段, 如果环境温度变化过快, 就会导致药柱内部温度梯度过大, 产生较大的热应力, 这将会对药柱内部质量产生很大影响。

5 结论

(1) 结合浇注PBX性能参数, 利用有限单元法对其固化过程中的温度场和应力场进行了计算, 并与实验相结合。环境温度是 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 固化初期药柱温度有一定程度的升高, 其中药柱中心温度最高为 $65 \text{ }^\circ\text{C}$, 并由药柱中心向模具内壁逐渐降低; 在 $3.88 \times 10^5 \text{ s}$ 时

药柱内部温度梯度较大。

(2) 应力集中区域主要分布在药柱下半部分; 在3种换热系数下, 药柱内部在 $3.88 \times 10^5 \text{ s}$ 时呈现出不同的应力集中, 其最大有效应力会随着换热系数的升高而增大。当换热系数为 $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 最大有效应力是6.69 kPa。

参考文献:

- [1] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂, 等. 军用混合炸药[M]. 兵器工业出版社, 1995: 349-358.
SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao, et al. Military composite explosive[M]. Weapon Industry Press, 1995: 349-358.
- [2] 李媛媛, 南海. 国外浇注PBX炸药在硬目标侵彻武器中的应用[J]. 飞航导弹, 2012(11): 88-91.
LI Yuan-yuan, NAN Hai. The application of casting PBX explosives in the hard target penetration weapon at foreign[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(11): 88-91.
- [3] 李敬明, 田勇, 张明, 等. 熔黑梯炸药固化过程的数值模拟与实验验证[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 428-430.
LI Jing-ming, TIAN Yong, ZHANG Ming, et al. Numerical simulation and experimental validation of RHT solidification process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao). 2009, 17(4): 428-430.
- [4] 马松, 袁俊明, 刘玉存, 等. 水浴和自然条件下熔铸炸药固化过程的数值计算[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 54-58.
MA Song, YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, et al. Numerical calculation of solidification process of melt-cast explosive in water bath and natural conditions[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 54-58.
- [5] 黄勇. 炸药熔铸过程数值模拟研究[J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2012: 106-107.
- [6] 马松, 袁俊明, 刘玉存, 等. DNAN炸药凝固过程的实验与数值模拟[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 240-244.
MA Song, YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, et al. Experiment and numerical simulation of DNAN solidification process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao). 2014, 22(2): 240-244.
- [7] 陈春燕, 王晓峰, 高立龙, 等. 固化参数对HTPB固化反应和力学性能的影响[J]. 化学研究与应用, 2013, 25(10): 1381-1385.
CHEN Chun-yan, WANG Xiao-feng, GAO Li-long, et al. Effects of NCO/OH molar ratio on the cure reaction and mechanical property of HTPB[J]. Chemical Research And Application, 2013, 25(10): 1381-1385.
- [8] 姜志刚. FBG光纤光栅的原理和应用[J]. 中国水运, 2008(5): 128-129.
JIANG Zhi-gang. Principle and typical current applications of fiber grating[J]. China Water Transport, 2008(5): 128-129.
- [9] 田勇. 炸药熔铸成型过程监测评价及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.
TIAN Yong. Process monitoring/evaluation and numerical simulation during casting explosive solidification[D]. Beijing: Graduate University of China Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics), 2010.
- [10] Mudryy R, Singh S. Modeling and simulation of melt cast explosives[C] // Insensitive Munitions and Energetic Materials Tech-

- nology Symposium. Arlington 2007.
- [11] 曹坚, 钱苏翔, 焦卫东, 等. 基于有限单元法的铸件三维温度场和应力场耦合计算研究[J]. 机械制造, 2007, 45(1): 15-17.
CAO Jian, QIAN Su-xiang, JIAO Wei-dong, et al. Numerical simulation of finite elements in 3-dimension temperature field and mechanical effects[J]. *Machinery*, 2007, 45(1): 15-17.
- [12] Maienschein J L, Nichols III A L, Reaugh J E, et al. Integrated experimental and modeling studies to predict the impact response of explosives and propellants[R]. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2005.
- [13] McClelland M A, Tran T D, Cunningham B J, et al. Cook off response of PBXN-109: material characterization and ALE3D model [C]// Proceedings of JANNAF 19th Propulsion Systems Hazards Subcommittee Meeting. 2000: 191.
- [14] 多英全, 陈福泰. 热塑性聚氨酯弹性体及推进剂生成焓的估算[J]. 推进技术, 2000, 21(6): 79-82.
DUO Ying-quan, CHEN Fu-tai. Estimation of formation enthalpy of thermoplastic polyurethane binder for novel thermoplastic propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(6): 79-82.
- [15] 李日, 马军贤, 崔启玉. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 中国水利水电出版社, 2010: 265-266.
LI Ri, MA Jun-xian, CUI Qi-yu. Casting process simulation ProCAST from abecedarian to proficiency[M]. *China Water Power Press*, 2010: 265-266.
- [16] Hamshere B L, Lochert I J, Dexter R M. Evaluation of PBXN-109: the explosive fill for the Penguin Anti-Ship Missile Warhead [R]. Defence Science And Technology Organisation Salisbury (Australia) Systems Sciences Lab, 2003.
- [17] Antić G, Rodić V, Borković Z. Influence of content and dispersion of octogene and oxidizer on the mechanical properties of cast aluminized PBX[J]. *Scientific Technical Review*, 2008, 58(2): 51-59.
- [18] McClelland M A, Tran T D, Cunningham B J, et al. Cookoff response of PBXN-109: material characterization and ALE3D thermal predictions [C] // Proceedings of 50th JANNAF Propulsion Meeting, Salt Lake City, UT, CPIA. 2001.

Experiment and Numerical Simulation of Curing Process of Cast PBX

ZHANG Bai-lei, CHANG Shuang-jun, YUAN Jun-ming, OU Ya-peng

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To research the change rule of temperature field and stress field in the curing process for cast PBX (Polymer Bonded Explosive, PBX), the temperature field in the curing process of cast PBX under 60 °C was tested by Bragg gratings. The numerical simulation of temperature fields and stress fields under different heat transfer coefficient during curing process of the cast PBX explosive were conducted by finite element method. Results show that in the first stage of curing reaction, the temperature of the grain is higher than 60 °C. The temperature in the central portion of the grain reach 65 °C. The decreasing trend of temperature is revealed from the center to internal wall of the mold. Largest temperature gradient appears at the 3.88×10^{-5} s. Stress concentration area is mainly located in the bottom of the grain. The effective stress concentration area and the maximum effective stress enlarge with increasing the heat transfer coefficient between model and grain. When the value of heat transfer coefficient is $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, the grain has the maximum stress concentration area at 3.88×10^{-5} s and the maximum effective stress is 6.69 kPa.

Key words: cast polymer bonded explosive (PBX); curing process; Bragg gratings; numerical simulation

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.006