

文章编号: 1006-9941(2008)01-0037-04

## TATB 基高聚物粘结炸药残余应力的测试和消除研究

周红萍, 李敬明, 李 丽, 韦兴文, 张伟斌, 温茂萍

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 以 TATB 基高聚物粘结炸药(PBX)为对象, 采用盲孔法测定了 PBX 炸药的初始残余应力及其分布, 研究了孔深和钻孔后应变读数时间对结果的影响, 以及样品热处理后对残余应力松弛的影响。结果表明: 孔深 3 mm 和钻孔后 10 min 的应变读数时间是适宜的实验参数。热处理能够明显降低和均化 PBX 炸药内部的残余应力, 75 °C 热处理 3 天能消除 50% 的残余应力并趋于稳定。

**关键词:** 材料力学; TATB 基高聚物粘结炸药; 残余应力; 盲孔法; 热处理

**中图分类号:** TJ55; O341; TB301

**文献标识码:** A

### 1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)由造型粉热压成型, 在压制成型过程中不可避免地要受到不平衡的温度分布和不均匀的挤压, 最终在成型的炸药件中存在一个残余应力场, 在残余应力的作用下, 炸药内部容易产生微裂纹。残余应力与药柱的质量、力学性能、环境适应能力、精密装配及库存可靠性等都密切相关。因此研究残余应力测试方法, 对控制炸药件加工工艺、消除残余应力等有一定的指导意义。

残余应力测量方法分两大类: (1) 物理方法, 主要有 X 射线法、超声法和磁性应变法。(2) 机械法, 主要有逐次切割法、套孔法和盲孔法等。其中盲孔法较为成熟, 易于现场操作, 精度也较高, 可测量各种材料的残余应力。如王元良<sup>[1]</sup>、刘波<sup>[2]</sup>等利用盲孔法测定了金属的残余应力。对构件残余应力的消除或降低残余应力也是十分必要的, 陈家权<sup>[3]</sup>、陈文汨<sup>[4]</sup>等利用盲孔法测定了热时效处理对金属构件残余应力的消除效果。而对含能材料残余应力的测试和消除, 目前研究很少。本工作采用盲孔法对以 TATB 为基的 PBX 炸药的初始残余应力及热处理方法进行了实验研究。

### 2 盲孔法测试残余应力的原理<sup>[5]</sup>

盲孔法测残余应力的基本原理是利用应力释放来测定残余应力的, 图 1 为盲孔法测量应力示意图。

如图 1 所示, 构件表面的残余应力一般是平面应

力问题, 可以用主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及方向角来描述。若构件内存在残余应力场( $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ), 在被测点钻一个小孔, 使被测点的残余应力得到释放, 并由事先贴在小孔周围的应变计感受因应力释放产生的应变, 再利用相应的力学计算公式得出该点的残余应力。残余应力及应变释放系数的理论公式见式(1)和式(2)。

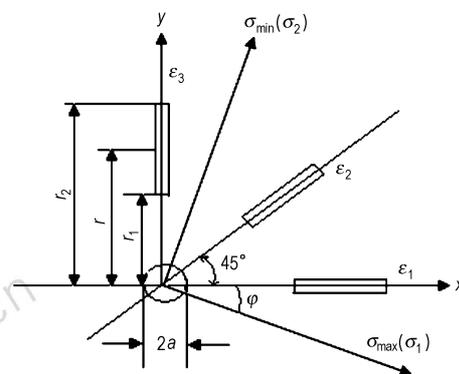


图 1 盲孔法测量应力示意图

Fig. 1 Sketch of stress measurement by blind-hole drilling method

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{E}{4A} (\epsilon_0 + \epsilon_{90}) \pm \\ &\frac{\sqrt{2}E}{4B} \sqrt{((\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{90} - \epsilon_{45})^2)} \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90} - 2\epsilon_{45}}{\epsilon_0 - \epsilon_{90}} \\ A &= \frac{(1 + \mu)a^2}{2r_1 r_2} \\ B &= \frac{2a^2}{r_1 r_2} \left[ \frac{(1 + \mu)a^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{4r_1^2 r_2^2} - 1 \right] \end{aligned} \right\} (2)$$

其中,  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{45}$  和  $\epsilon_{90}$  分别为相应应变计钻孔后测得的释放应变,  $A$ 、 $B$  为应变释放系数,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为最大和

收稿日期: 2007-03-28; 修回日期: 2007-08-23

基金项目: 中物院化工材料研究所所长基金资助(62601040310)

作者简介: 周红萍(1977-), 女, 助理研究员, 硕士研究生, 从事含能材料无损检测技术研究及应用工作。

最小残余应力,本文主要研究最大残余应力  $\sigma_1$ 。 $a$  为钻孔半径,  $r_1$  和  $r_2$  为应变计两端离孔中心的距离,  $\mu$  为材料的泊松比。

应变释放系数既可以通过式(2)的理论公式求得,也可以利用标定试验确定。根据圣维南原理<sup>[6]</sup>以及大量实验都证明<sup>[7]</sup>当孔深孔径比  $\geq 1$  时,孔深的变化对应力释放系数的变化不再明显,可直接将通孔应变释放系数应用到盲孔上,本文直接由理论公式计算。

### 3 TATB 基 PBX 炸药残余应力测试条件

测试仪器为 YJ-25 型静态电阻应变仪和 P20R-25 型预调平衡箱,应变片型号为 BE-120-2CA-K 型,钻孔直径 2 mm。样品为经压制成型的  $\Phi 20$  mm  $\times$  10 mm 和  $\Phi 50$  mm  $\times$  15 mm 两种尺寸规格的 PBX 炸药柱,试件测点布置及应变花方向见图 2。

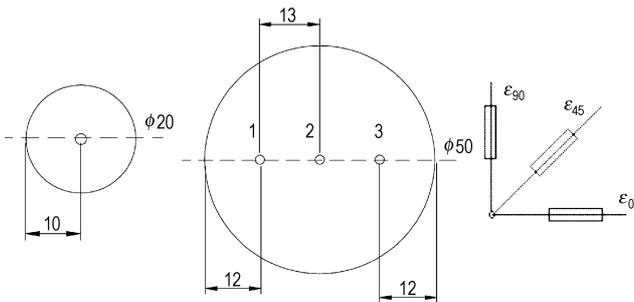


图 2 试件测点布置及应变花方向

Fig. 2 Test point of samples and orientation of strain gauge

## 4 试验结果及讨论

### 4.1 孔深对残余应力测试结果的影响

为选择一个合理的孔深作为盲孔法测残余应力的试验参数,对以 TATB 为基的 PBX 炸药柱在孔径 2 mm 的钻孔过程中应变和应力随孔深  $h$  的变化进行了研究,结果见表 1。

表 1 孔深对应变和应力的影响

Table 1 Effects of hole depth on strain and stress

$h/\text{mm}$	$\varepsilon_0 \times 10^{-6}$	$\varepsilon_{45} \times 10^{-6}$	$\varepsilon_{90} \times 10^{-6}$	$\sigma_1/\text{MPa}$
2	-120	-66	-48	4.1
3	-123	-148	-133	5.6
5	-127	-157	-132	5.7

Note:  $h$  is hole depth;  $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$  are strains of three directions, respectively;  $\sigma_1$  is maximal residual stress.

从表 1 可以看出:孔深为 3 mm 时的应变和残余应力明显大于 2 mm 时的应变和残余应力,而 5 mm 时的应变和残余应力与 3 mm 时的值基本一致。由此确

定了孔深 3 mm 比较合适。在以后的实验中都确定了孔直径 2 mm 孔深 3 mm 的一致化条件。

### 4.2 钻孔后应变读数时间对残余应力测试结果的影响

对以 TATB 为基的 PBX 炸药,在钻孔直径 2 mm 深度 3 mm 的情况下,应变读数在 10 min 内基本趋于稳定(见图 3)。

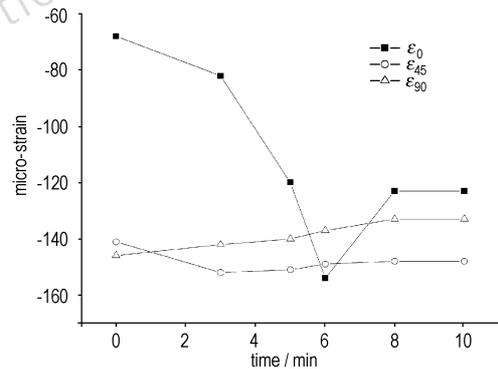


图 3 应变读数随时间变化关系

Fig. 3 Change of strain value with time

### 4.3 $\Phi 20$ mm $\times$ 10 mm 样品的残余应力测试

以  $\Phi 20$  mm  $\times$  10 mm 样品的中心点作为残余应力测试点,连续进行了 3 发同批样品的测试,它们的最大残余应力分别为 5.6, 4.2, 4.0 MPa。平均残余应力为 4.6 MPa,标准偏差为 0.87 MPa。

TATB 基 PBX 炸药的残余应力通过热处理的方式来消除,我们研究了 75 °C 条件下热处理前后 PBX 炸药的内部密实性和残余应力变化。由于超声 C 扫描图像可以反映材料内部密度的差异<sup>[8]</sup>,所以本实验采用超声 C 扫描技术直观形象的测定了 TATB 基 PBX 炸药热处理前后内部密实性的变化情况(见图 4)。

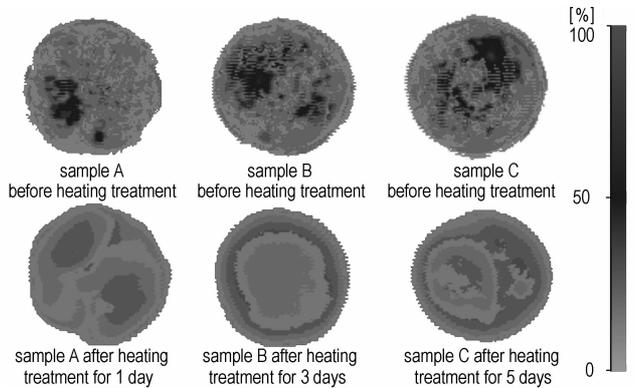


图 4 样品热处理前后超声 C 扫描图像

Fig. 4 C-scan images of samples before and after heating treatment

图 4 中灰度颜色深浅表示了样品反射波幅的高

低,再进而反映样品的密实性,可见热处理后样品的整体密度有所下降。另外值得注意的是热处理后样品内部之间的灰度色差变小,说明样品内部的质量状况主要是密实性更加趋于均匀一致。

表 2 给出了 3 发样品经过不同热处理时间后残余应力的变化。

表 2 热处理时间对残余应力的影响

Table 2 Effects of heating time on residual stress of PBX based on TATB

stress	$\sigma_1$ /MPa	stress relaxation /MPa	stress relaxation /%
before heating treatment	4.6	-	-
heating treatment for 1 day	2.9	1.7	37
heating treatment for 3 days	2.3	2.3	50
heating treatment for 5 days	2.0	2.6	57

从表 2 可以看出:存在于 TATB 基 PBX 炸药中的残余应力经过热处理,其值已经大幅度下降。并且在热处理时间为 1 天、3 天和 5 天的过程中,随着热处理时间延长,残余应力降低幅度也在增大,75 °C 热处理 3 天能消除 50% 的残余应力并趋于稳定。

#### 4.4 $\Phi 50$ mm $\times$ 15 mm 样品的残余应力测试

为了研究同一发样品中残余应力的分布规律,选择了  $\Phi 50$  mm  $\times$  15 mm 样品进行测试,在样品的表面选择了三个测试点:中心点(第 2 点)、直径方向距中心点分别为 13 mm 的左(第 1 点)右(第 3 点)两点(见图 2)。测试结果见表 3。

表 3 初始残余应力测试结果

Table 3 Initial residual stress of PBX based on TATB at different test point

sample	$\sigma_1$ /MPa			
	point 1	point 2	point 3	average
A	13.2	1.5	3.7	6.1
B	6.0	9.0	4.0	6.3
C	7.0	7.2	12.3	8.8
D	10.4	5.5	5.9	7.3

Note: Test point 1, 2, 3 are shown in Fig. 2.

从表 3 可以看出:同一发样品内部的残余应力分布并不均匀,而且相对圆心也不呈对称分布。同一批次不同编号的样品在相同位置的残余应力差别也很大,但它们的平均残余应力还是比较接近,四发样品平均残余应力的平均值为 7.1 MPa,并计算得标准偏差 1.2 MPa。将  $\Phi 50$  mm  $\times$  15 mm 样品的平均残余应力 7.1 MPa 的结果与前面 4.3 中  $\Phi 20$  mm  $\times$  10 mm 样品

平均残余应力 4.6 MPa 的结果对比,说明规格越大的样品其残余应力也越大,这可能是不同规格样品的压制条件不同造成的。

研究了同一发样品上下两表面相同测试点的残余应力,结果见表 4。

表 4 样品上下测点初始残余应力测试结果

Table 4 Initial residual stress of upside and underside point for PBX based on TATB

sample	$\sigma_1$ /MPa			
	point 1	point 2	point 3	average
upside	13.2	1.5	3.7	6.1
underside	10.0	2.1	4.6	5.6

从表 4 可以看出:样品上下两表面相同位置处的测点残余应力测试结果重复性较好。所以在研究热处理对残余应力的影响时,可从样品下表面测出初始残余应力,进行热处理,然后从样品上表面位置测出热处理后的残余应力。具体测试结果见表 5。

表 5 热处理时间对残余应力的影响

Table 5 Effects of heating time on residual stress of PBX based on TATB

heating time	point	$\sigma_1$ /MPa		stress relaxation	average of stress relaxation
		before heating	after heating		
1 day	1	6.0	4.8	20%	18%
	2	9.0	6.3	30%	
	3	4.0	3.9	3%	
3 days	1	7.0	3.9	44%	46%
	2	7.2	4.7	35%	
	3	12.3	4.9	60%	
5 days	1	10.4	2.2	79%	52%
	2	5.5	4.1	25%	
	3	5.9	2.9	51%	

从表 5 可以得出与表 2 相似的结论,另外从热处理前后的残余应力数值来看,同一发样品热处理后各点之间的残余应力明显得到均化,这个结论与图 4 结果一致。TATB 基 PBX 炸药在成型过程中受到了温度应力和挤压应力,使成型后的药柱体内产生了密实性分布和残余应力场,在一定温度下一定时间热处理后,体内的密实性自发地从不平衡状态过渡到平衡状态,应力集中也得到了部分释放和均化。

## 5 结论

(1) 同一发 TATB 基 PBX 炸药样品内部各点之间的初始残余应力分布不均,但同一批样品的总应力平均

值比较接近。规格较大的样品其残余应力也越大。

(2) 75 °C 热处理后,残余应力大幅度下降。随热处理时间延长残余应力降低幅度增大,75 °C 热处理3天能消除50%的残余应力并趋于稳定。

(3) TATB 基 PBX 炸药热处理后密实性变得更加均匀。与热处理前相比,热处理后样品内部各点之间的残余应力均化。

#### 参考文献:

- [1] 王元良,陈明鸣. LD10 铝合金残余应力测试及分析[J]. 中国有色金属学报,1997,7(4): 149 - 153.  
WANG Yuan-liang, CHENG Ming-ming. Test and analysis of residual stress of alloy aluminium LD10[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(4): 149 - 153.
- [2] 刘波,王辉. 焊接残余应力的小孔法测试[J]. 机械设计与制造, 2004, (3): 99 - 100.  
LIU Bo, WANG Hui. Test for residual weld stress with little hole method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2004, (3): 99 - 100.
- [3] 陈家权,邓晓丽,沈炜良,等. 柴油机缸体铸件的热时效处理[J]. 铸造,2003,52(8): 581 - 583.  
CHEN Jia-quan, DENG Xiao-li, SHEN Wei-liang, et al. Heat ageing of casting of diesel blocks[J]. *Foundry*, 2003, 52(8): 581 - 583.
- [4] 陈文汭,张利,金立业,等. 焊接残余应力的分布和焊后热处理的应力松弛作用[J]. 金属热处理,2002,27(2): 30 - 32.  
CHEN Wen-mi, ZHANG Li, JIN Li-ye, et al. Distributions of residual welding stress and effect of post-weld heat treatment on its relaxation [J]. *Metal heat treatment*, 2002, 27(2): 30 - 32.
- [5] 吴宗岱,陶宝祺. 应变电测原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社,1982.
- [6] 刘北辰,陆鸿森. 弹性力学[M]. 北京: 冶金工业出版社,1978.
- [7] 吉德三. 铸铁件残余应力测试与处理[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(增刊): 116 - 119.  
JI De-san. Testing and doing away with the remaining strain of cast iron moulding[J]. *Journal of Guizhou University of Technology*, 1997, 26(Supplement): 116 - 119.
- [8] 王浩全,曾光宇. 玻璃纤维复合材料超声 C 扫描检测研究[J]. 兵工学报,2005,26(4): 570 - 572.  
WANG Hao-quan, ZENG Guang-yu. Research on ultrasonic scan imaging for glass fiber materials [J]. *Journal of China Ordnance*, 2005, 26(4): 570 - 572.

## Testing and Relieving of Residual Stress for Polymer Bonded Explosive Based on TATB

ZHOU Hong-ping, LI Jing-ming, LI Li, WEI Xing-wen, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping

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

**Abstract:** The initial residual stress of the polymer bonded explosive based on TATB and its distribution were tested by blind-hole drilling method. The effects of hole depth and time of strain record on the testing result and the effects of heating treatment on residual stress relaxation were studied. The results show that 3 mm hole depth and 10 min time of strain records are suitable experimental parameters. The residual stress reduces to about 50% and tends to be steady by heating treatment at 75 °C for 3 days.

**Key words:** materials mechanics; polymer bonded explosive based on TATB; residual stress; blind-hole drilling method; heating treatment