

文章编号: 1006-9941(2014)05-0674-04

压应力对浇注 PBX 装药侧隙缺陷的影响

席鹏^{1,2}, 王晓峰¹, 郑亚峰¹, 南海¹, 郭昕¹, 杨建钢¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安交通大学材料学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用加压技术,研究了压应力和邵氏硬度对一种浇注高聚物粘结炸药(P-1)装药固化后侧隙缺陷的影响,分析了压应力、应变的关系,得到了P-1炸药加压固化过程中压应力-应变曲线的方程。对采用加压固化的炸药进行了CT检测。结果表明:当应变小于3.232%时,压应力低于0.071 MPa,压缩模量2.27 MPa。当应变大于3.232%时,压应力和模量值迅速上升。固化5~25 h,邵氏硬度由3 HA增加到59 HA。在初始邵氏硬度为8~24 HA时,施加14.2 kPa压应力,应变为1.3%。辅助加压技术可有效消除装药侧隙缺陷。

关键词: 材料科学; 浇注高聚物粘结炸药; 缺陷; 力学性能; 邵氏硬度; CT检测

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.018

1 引言

浇注高聚物粘结炸药(PBX)是一种低缺陷、成分均匀、机械强度和能量输出结构易于调节的低易损炸药,广泛应用于侵彻战斗部、水中兵器等^[1-2]。与传统的压装PBX和TNT基熔铸炸药相比^[3-4],浇注PBX在成型过程中不必承受数百兆帕的压应力,无裂纹、晶体破裂等缺陷;浇注PBX具有较强的粘弹性且流体密度与装药密度相近,在装药内部也不会产生类似TNT基熔铸炸药的疏松、裂纹等缺陷。浇注PBX属于内聚式固化,成型过程中装药与壳体之间脱粘,易形成底隙或者侧隙。在大药量装药过程中,由于药量的自重作用,底隙和靠近底部的侧隙受装药重力消除,但是在装药中间和上部,尤其是装药表面形成的侧隙难以避免。侧隙缺陷会导致装药量降低,危险性增加^[5]。

为了消除浇注PBX固化过程中存在的侧隙缺陷,传统的装药工艺一般通过增加装药量,利用富余药量的自重消除侧隙缺陷。然而该方法导致无效药量增多、药面修整工作量大、装药成本高、并且给弹体尾部螺纹清理和引信装配带来诸多不便,不适合大口径弹体装药。黄勇等^[6]提出一种氮气加压技术用于消除熔铸炸药缩孔缺陷,但是由于浇注PBX炸药药浆粘

稠,混入气体无法排除,因此不适合气体加压方法。文献[7]报道了一种适用于复合推进剂的机械加压方式,并进行了有效性分析,但是未公开其加压方法和加压装置。为此,本研究采用一种新型辅助加压技术,探索了浇注PBX的固化行为,提出了消除浇注PBX侧隙缺陷的技术途径,对浇注PBX炸药在大口径弹体中的应用具有指导意义。

2 试验

2.1 配方及装药性能

选用西安近代化学研究所研制的浇注PBX(P-1炸药),其配方为(质量分数):端羟基粘结剂10%,RDX64%,Al粉20%,其它6%。采用真空浇注工艺,固化时间48h,装药密度 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,采用GJB772A-1997标准418.1方法测试裸药柱弹性模量2~3 MPa,极限破坏应力为0.14 MPa。

2.2 试验装置

试验装置主要由压杆、定位板、模具(壳体)、压板、约束层组成,如图1所示。其中,压应力与应变关系试验中模具尺寸:壁厚5 mm,内径40 mm,深度60 mm,装药高度40 mm,约束层采用聚四氟乙烯,压板、压杆和模具采用45#钢;固化过程压缩量和初始邵氏硬度关系试验以及压力对侧隙缺陷的影响试验中模具尺寸:内径250 mm,深度500 mm,装药高度400 mm,约束层为0.5 mm厚防静电绝缘纸,直径249 mm,压板为铍青铜,直径240 mm,其它模具和装置为45#钢。

收稿日期: 2013-07-11; 修回日期: 2014-01-07

基金项目: 火炸药基础专项

作者简介: 席鹏(1985-),男,工程师,主要从事炸药配方及工艺研究。
e-mail: xipeng-57@163.com

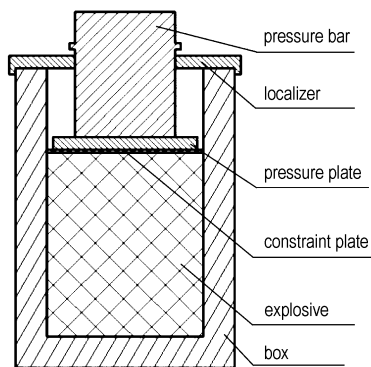


图 1 试验装置

Fig.1 Equipment used for experiment

2.3 测试方法

将 P-1 炸药浇注到 $\Phi 40\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 模具内, 室温固化 48 h, 按照图 1 装置, 采用西安近代化学研究所研发的非标压机测试装药在约束条件下的力学性能。压机最大压力 30 kN, 具备样品恒温 and 压力、位移、时间等测试功能; 压力测试相对误差 0.29%, 位移测量相对误差 0.28%, 温度测试精度 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验过程压缩速率 $5\text{ mm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

将 P-1 炸药浇注到 $\Phi 250\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 模具内, 装药量约 30 kg, 装药高度 400 mm; 固化过程中在装药表面覆盖一层 0.01 mm 厚聚乙烯薄膜, 采用温州一鼎仪器制造有限公司生产的 LX-A 型邵氏硬度仪测试装药表面硬度; 固化过程中采用恒压模式对压杆给压, 通过压杆位移变化测量装药的压缩量。采用西安航天化学动力厂提供的 4MeV 工业 CT 对装药进行无损检测。

2.4 安全措施

由于炸药的危险性, 试验过程必须减缓冲击和摩擦作用。在直径 250 mm 试验模具压力试验中, 设计与炸药相容性优良的防静电绝缘纸垫与药面直接接触, 纸垫直径小于模具内径 1 mm, 给予装药一定的自由释放面。镀青铜压板直径 240 mm, 远小于模具内径。如果压应力过大, 则装药在挤压作用下破坏纸垫, 通过压板与模具之间的环状缝隙流出, 保证装药安全。

3 结果与分析

3.1 压应力与应变的关系

压应力的大小设计是加压技术的核心技术之一。压应力过小可能会有部分侧隙残余, 压应力过大易影响装药性能, 甚至产生二次缺陷; 为设计适当的压力,

采用图 1 所示试验装置, 测试了固化成型后 P-1 炸药在约束条件下的炸药压应力 (σ)-应变 (ε) 关系, 试验数据及拟合曲线如图 2 所示。

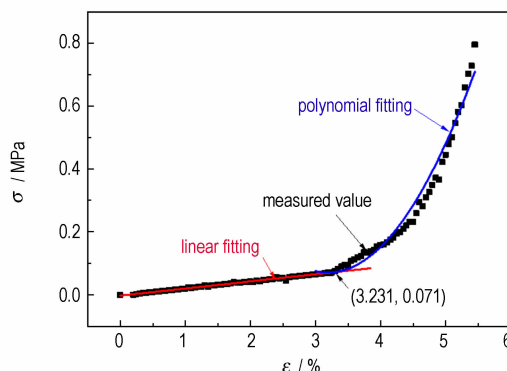


图 2 P-1 炸药的试验结果及拟合 σ - ε 曲线

Fig.2 Experimental results and fitting σ - ε curves for P-1 explosive

从图 2 可以看出, 在压应力作用下, 受约束的 P-1 炸药随着应变的增加, 所需压应力逐渐增大, 尤其是在应变大于 3.232% 以后, 压应力迅速增高。对压应力-应变关系进行直线拟合和二次多项式拟合, 建立了拟合方程(1)。

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) = \begin{cases} 2.27\varepsilon - 0.0024, & \varepsilon \leq 3.232\% \\ 1260\varepsilon^2 - 80.6\varepsilon + 1.36, & \varepsilon > 3.232\% \end{cases} \quad (1)$$

从拟合方程(1)可以看出, 在约束条件下, 药浆压应力-应变关系可以分为两个阶段, 即直线阶段和曲线阶段, 在应变为 3.232% 时出现拐点。当应变小于 3.232% 时, 压应力低于 0.071 MPa。当应变大于 3.232% 以后, 压应力明显增大。将方程(1)微分, 得到 $d\sigma/d\varepsilon$ 的表达式(2), 即压缩模量(E)和应变(ε)的关系。

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \begin{cases} 2.27, & \varepsilon \leq 3.232\% \\ 2520\varepsilon - 80.6, & \varepsilon > 3.232\% \end{cases} \quad (2)$$

分析式(2), 在 $\varepsilon \leq 3.232\%$ 时, P-1 炸药压缩模量为 2.27 MPa, 结合图 2 分析认为, 在 $\sigma < 0.071\text{ MPa}$ 时, 装药发生轴向压缩, 径向增长, 填充因固化收缩形成的侧向空隙; 随着压应力增大, 装药应变继续增加, 但是炸药径向尺寸受到模具约束不再增长。 $\varepsilon > 3.232\%$ 时, 压缩模量大于 2.27 MPa, 而且在 $\varepsilon = 3.232\%$ 处出现拐点, 当 $\varepsilon > 3.232\%$ 后, 压缩模量急剧升高, 装药内部结构因压缩而发生变化的风险增加。因此, P-1 装药在承受不高于 0.071 MPa 压应力时, 装药发生的变形过程可以看作是填充侧隙的塑形流动, 不会影响装药微观结构, 也不会出现炸药晶体破裂等二次缺陷。

3.2 加压的时间条件

在药浆固化过程中,药浆粘度和弹性模量逐渐增高,其产生相同压缩应变所需的压应力逐渐增大。为研究固化过程温度、硬度和固化时间的关系,控制 P-1 炸药装药降温速率,固化温度在 48 h 内由 75 °C 降低到室温 (25 °C),测试固化过程中装药的邵氏硬度。实验结果如图 3 所示。

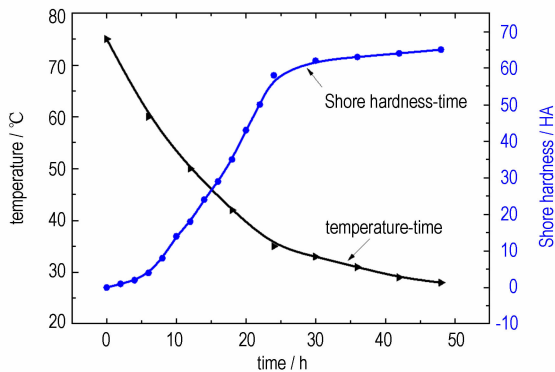


图 3 固化过程温度和硬度随时间的变化曲线

Fig. 3 Temperature and Shore hardness vs time in curing process for P-1 explosive

从图 3 可以看出,在固化过程中,固化温度逐渐降低,在 0~30 h 内,装药温度由 75 °C 降低了近 40 °C;在 30 h 以后,装药温度变化逐渐趋缓;随着固化时间增长,装药邵氏硬度增高,且具有明显的分段特点:固化时间在 0~5 h 范围内,随着固化时间增长,硬度缓慢增加;固化时间在 5~25 h 之间时,装药邵氏硬度迅速由 3HA 增加到 59HA 左右;在固化 25 h 以后,装药邵氏硬度趋于稳定状态,约 65HA。

根据图 3 试验结果,设计在不同固化时间内对装药施加压力,分析初始硬度对加压效果的影响。结合 2.1 分析,当压应力小于拐点应力时,不会出现二次缺陷,为保证装药的安定性,应尽量减小压应力。本研究设计压应力值为拐点应力的 20%,即 14.2 kPa。在固化过程中的不同时期,施加 14.2 kPa 压应力,研究装药持续到完全固化后的压缩量和初始邵氏硬度的关系,结果如图 4 所示。

当装药硬度小于 8HA(图 4 中的虚线段),处于流体状态的炸药药浆在压应力作用下破坏约束层纸垫,从模具和压板之间的环隙中流出,导致压缩量急剧增加;当初始邵氏硬度在 8~24HA 之间时,压缩量保持在 5.2 mm,压缩应变 1.3%;当初始邵氏硬度为 24~35HA 时,随着初始硬度的增大,压缩量明显降

低,由最大值 5.2 mm 迅速下降到 2.4 mm,降幅超过 50%;在邵氏硬度大于 35HA 以后,压缩量小于 2.4 mm,接近完全固化后的 2 mm,且固化后依然存在明显的侧隙缺陷。

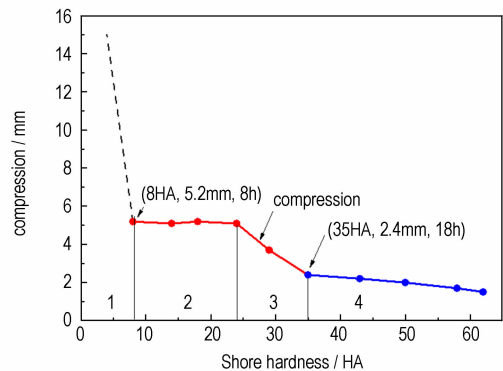


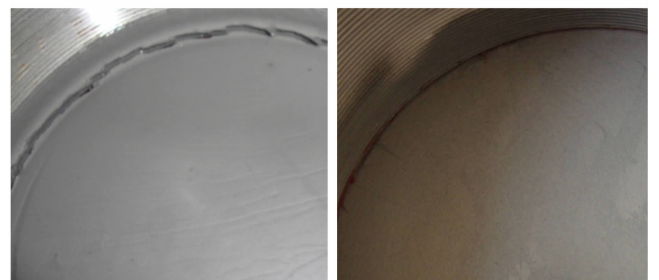
图 4 固化过程压缩量和初始邵氏硬度的关系

Fig. 4 Relationship between amount of compression and initial Shore hardness in curing process

3.3 压力对侧隙缺陷的影响

为研究辅助压力对装药侧隙缺陷的影响,将实施辅助压力和未实施辅助压力的装药进行对比分析,实验后装药表面形貌如图 5 所示,其中实施辅助的压应力为 14.2 kPa,初始硬度 18HA,初始装药温度 50 °C,持续时间 36 h。从图 5 可以看出,与未实施辅助压力的装药(图 5a)相比,施加过辅助压力(图 5b)的装药表面密实,与模具内壁接触良好,无明显的侧隙缺陷。为验证辅助压力对装药内部缺陷的影响,对装药面以下不同深度的截面进行 CT 无损检测,结果表明,装药内部密实、密度均匀,无侧隙缺陷,其中 300 mm 截面 CT 图如图 6 所示。

从图 5b 和图 6 可以看出,在施加辅助压力后,装药侧隙缺陷消失,所采取的辅助加压措施可以有效消除装药中的侧隙缺陷。



a. without pressing technology b. with pressing technology

图 5 不同固化条件下装药表面照片

Fig. 5 Surface photos of the charge under different curing conditions

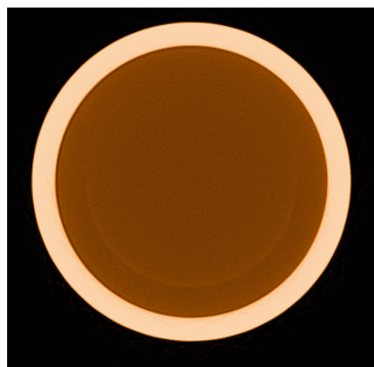


图 6 加压后装药 CT 照片

Fig. 6 The CT photos of the inner charge with pressurized curing technology

4 结 论

(1) 在约束条件下, P-1 炸药压应力-应变关系分为两个阶段: 当应变小于 3.232% 时, 压应力低于 0.071 MPa, 压缩模量 2.27 MPa; 当应变大于 3.232% 以后, 压应力明显增大, 压缩模量急剧升高。

(2) 在固化过程中, 装药温度逐渐降低, 邵氏硬度逐渐增高, 固化时间在 5~25 h 内, 邵氏硬度由 3HA 迅速增加到 59HA, 随后趋于平缓并接近完全固化后的邵氏硬度值 65HA。

(3) 对于直径 250 mm, 装药高度 400 mm 的 P-1 炸药, 初始邵氏硬度处于 8~24HA 时, 施加 14.2 kPa

压力, 装药压缩量和应变恒定; 初始邵氏硬度大于 24HA 时, 压缩量和压缩应变逐渐下降; 初始邵氏硬度大于 35HA 之后, 压缩量接近 2 mm。

(4) 在浇注 PBX 炸药的固化过程中适当施加辅助压力, 可以有效消除装药中的侧隙缺陷。

参考文献:

- [1] 孙国祥. 混合炸药及其发展[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 27-79.
- [2] 孙华, 郭志军. PBX 炸药技术特性及在水中兵器上的应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(3): 108-111.
SUN Hua, GUO Zhi-jun. Characteristics of PBX dynamite and its application in undersea weaponry[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, 20(3): 108-111.
- [3] 梁华琼, 雍炼, 唐常良, 等. 压制过程中 PBX 炸药颗粒的破碎及损伤[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 27-30.
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Crack and damage of PBX during pressing[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(1): 27-30.
- [4] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 169-212.
- [5] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
Л. П. ОРЛЕНКО. Explosion physics[M]. SUN Cheng-wei. Beijing: Science Press, 2011.
- [6] 黄勇, 郑保辉, 谢志毅, 等. 熔铸炸药加压凝固过程研究[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 21-29.
HUANG Yong, ZHENG Bao-hui, XIE Zhi-yi, et al. Pressured solidification process of melt-cast explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 21-29.
- [7] 荒井敬司. 固体火箭发动机加压固化的研究[J]. 国外固体火箭技术, 1984, 12(2): 54-63.

Influence of Compressive Stress on Annular Gap Defect of Casting-PBX Charge

XI Peng^{1,2}, WANG Xiao-feng¹, ZHENG Ya-feng¹, NAN Hai¹, GUO Xin¹, YANG Jian-gang¹

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The influence of compressive stress and Shore hardness on the annular gap defect of a casting polymer bonded explosive (P-1 explosive) charge after curing was studied using a compression technology. The relationship between stress and strain was analyzed. The equation of stress-strain for P-1 explosive compression curing process was obtained. The detection of the explosive was carried out by CT. Results show that the compressive stress is lower than 0.071 MPa and the compression modulus is 2.27 MPa when the strain is less than 3.232%. The values of stress and modulus rise rapidly when the strain is greater than 3.232%. The Shore hardness of the explosive increases from 3 HA to 59 HA after 5~25 h curing. When the initial value of Shore hardness is within 8~24 HA and the compressive stress of 14.2 kPa is imposed on the explosive, the compressive strain is 1.3%. The auxiliary compression technology can effectively eliminate the annular gap defect of the charge.

Key words: material science; casting polymer bonded explosive; defect; mechanical property; Shore hardness; CT detection

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.018