

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.004

成型温度对 PBX 装药内部质量及性能的影响*

周忠彬 高金霞 袁宝慧
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 针对压制成型的 PBX 炸药装药,选择 CT 无损检测、巴西实验和扫描电镜检测等技术,对比研究了室温 and 加热两种温度下压制成型的炸药装药内部质量、静态力学性能和细观破坏形式。结果表明,加热压制有利于改善炸药装药的内部质量,可避免产生初始损伤,且提高了装药的力学性能。细观尺度上,室温压制成型的装药主要发生界面脱黏破坏,加热压制成型装药的主要破坏形式是穿晶断裂。

[关键词] PBX 炸药;压制成型温度;巴西实验;CT 检测;细观破坏

[分类号] TJ55;O64

Influence of Molding Temperature on the Internal Quality and Properties of PBX Explosive Charge

ZHOU Zhongbin, GAO Jinxia, YUAN Baohui
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] CT detection, Brazilian experiment and scanning electron microscope detection were selected to compare the internal quality, static mechanical properties and micro-scale damage forms of PBX explosive charge pressed and formed at room temperature and heating temperature. Results show that heating and pressing can improve the internal quality of explosive charge, avoid initial damage and improve the mechanical properties of charge. On the mesoscale, the main failure form of the charge pressed at room temperature is interface debonding, and that of the charge pressed by heating is trans-granular fracture.

[KEYWORDS] PBX explosive; pressing temperature; Brazilian test; CT detection; micro-scale damage

引言

随着军事技术的不断发展,涌现了大量现代高性能武器。战斗部是各类弹药实现毁伤效能的重要作战单元,而影响毁伤效能的重要因素之一就是装药质量^[1-2]。在弹药生产过程中,装药工艺及参数直接关系着装药质量^[3]。工艺参数设置不合理,将会导致成型炸药产生裂纹、缩孔、气泡及装药密度不均匀等缺陷,这会严重影响弹药的毁伤性能、发射安全性及侵彻安定性等^[4-5]。

压装法具有生产周期短、适用炸药广、药柱爆轰感度相对较高等优势,是一种相对应用广泛且不可缺少的装药方式^[6]。在炸药压制成型过程中,影响药柱成型质量的工艺因素很多,如加载在冲头上的

压力、保压时间、循环次数、药粉温度、药粉装填质量和松弛程度等^[7]。压力和保压时间对药柱成型质量的影响最先得到关注。其中,压力过大或过小都可能使成型药柱的内部结构发生变化,产生密度不均匀的问题。压力达到规定值时需要进行保压。若保压时间较长,则药柱密度会随加载时间的延长而提高;但过长时间的保压会引起药柱的蠕变,导致药柱的物理稳定性变差^[8-9]。选择合适的保压时间是提高成型药柱质量的关键。药粉温度变化是影响成型药柱质量的又一重要因素,常使用的室温压制工艺简单,药粉不需加热,但 CT 检测发现,成型药柱内部存在裂纹,偶尔伴随有低密度区现象,严重制约了药柱的使用范围。

本文中,以某高聚物黏结炸药(polymer-bonded explosives,简称 PBX)为对象,对造型粉在室温压制

* 收稿日期:2022-04-13

基金项目:国家安全重大基础研究项目

第一作者:周忠彬(1984-),男,高工,主要从事侵彻战斗部装药及总体结构设计研究。E-mail:zhouzh3002@126.com

和加热压制两种工艺条件下的成型质量、静态力学性能的差异进行了对比研究,分析压制时温度差异对成型炸药装药性能的影响。

1 实验部分

1.1 材料及成型工艺

PBX 炸药的压制成型压力为 200 MPa。压制前,将一定质量的药粉倒入专用的成型模具中;在室温或加热条件下均采用人机隔离的措施压制药柱,且压制过程中严格监测压机的压力数值变化,确保人员和设备安全。

为方便研究,防止事故发生,选择 PBX 炸药的模拟材料为研究对象。该 PBX 模拟材料主要由硝酸钡颗粒和氟橡胶黏结剂等组成,压制成型压力为 200 MPa,加热温度为 100 ℃,通过电加热模具外层的石蜡传热实现加热。温度由置于石蜡中的温度传感器控制。加热压制和室温压制时,压力达到规定值时均保压 5 min,然后升、卸压循环 3 次,最后保压 30 min^[10]。加热压制完成后,采用自然冷却降温,室温下退模,得到试样。

1.2 实验方法

选择巴西实验测试成型药柱的静态拉伸力学性能^[11]。巴西实验的试样为圆盘状,尺寸为直径 20 mm、厚度 20 mm,采用准静态径向加载。原理如图 1 所示,在圆盘试样的侧表面施加沿试样长度均匀分布的两个对等径向集中载荷,则在试样内垂直于加载面方向上产生拉应力,当超过材料的抗拉强度时,试样劈裂破坏。根据二维弹性理论,各向同性材料中心点的拉伸强度 σ_t 为:

$$\sigma_t = \frac{2p_t}{\pi DB}。$$

(1)

式中: p_t 为圆盘试样劈裂时的压缩载荷; D 为试样直径; B 为试样厚度。

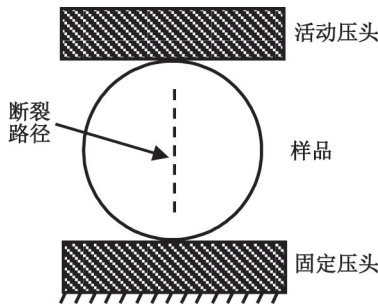
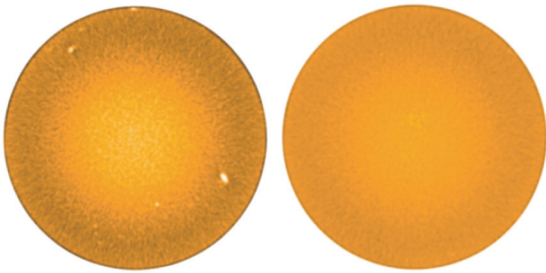


图 1 巴西实验
Fig. 1 Brazilian test

2 结果与讨论

2.1 压制温度对 PBX 内部质量的影响

准备室温压制和加热压制成型的 PBX 圆盘试样。巴西实验前,采用工业 CT 无损检测技术对圆盘 1/2 高度的横截面进行检测,结果分别如图 2 所示。对比 CT 检测结果看到,室温压制成型的 PBX 内部存在较明显的密度分布不均匀现象,约 2/3 半径的中心区域密度较均匀,且与之相比较,外侧约 1/3 半径的圆环区域密度略高,并有初始空隙损伤存在(白色亮点)。加热压制成型的 PBX 内部质量良好,且密度基本一致,无初始损伤。



(a) 室温压制 (b) 加热压制
图 2 PBX 试样的 CT 结果

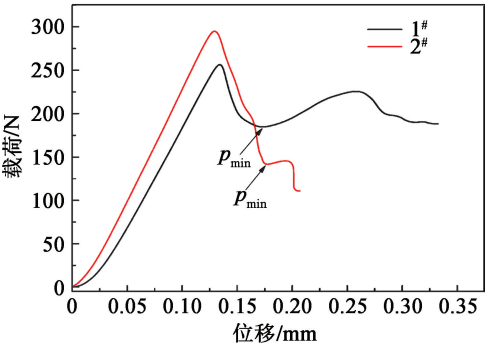
Fig. 2 CT detection results of PBX sample

2.2 压制温度对 PBX 静态力学性能的影响

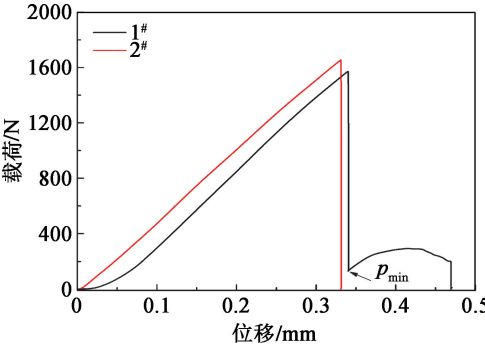
对室温压制和加热压制的圆盘试样进行准静态巴西实验,位移加载速率为 0.1 mm/min,材料实验机记录得到载荷随加载位移(或加载时间)的变化曲线。

图 3(a)是室温压制成型试样的载荷-位移变化关系。结果表明,载荷随加载位移的增加几乎呈线性增大。当载荷达到最大时,圆盘发生破坏;随后,载荷降低,并伴随着裂纹的不断扩展;当载荷降低至最小局部载荷 p_{min} 时,分析认为,此时裂纹已贯通圆盘,由于 PBX 炸药的脆性相对较小,劈裂的圆盘仍可以继续承载,因此,经过 p_{min} 后载荷出现缓慢爬升,达到第二次载荷峰值,但此载荷远小于第一次载荷峰值;最后,圆盘试样破碎,载荷降低。

图 3(b)给出了加热压制成型试样的载荷-位移曲线。可以看到:在达到最大载荷之前,载荷随位移的增加也是线性增大的;达到载荷峰值时,圆盘发生破坏,载荷迅速降低。实验中也记录到类似于室温压制成型试样的载荷-位移变化规律曲线。在圆盘试样破坏后,载荷迅速降低至局部最小载荷 p_{min} ,此时圆盘已劈开成两半圆盘,经历二次承载过程,最后



(a) 室温压制



(b) 加热压制

图 3 PBX 载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of PBX

破碎。对比分析图 3(a)、图 3(b)看到,室温压制成型和加热压制成型 PBX 的载荷-位移曲线有明显差别,特别是载荷峰值过后,载荷随位移变化的曲线差别很大,这说明受压制温度的影响,PBX 表现出明显不同的静态力学响应。

巴西实验可准确地测得 PBX 圆盘试样中心承受的拉伸载荷,结合数字图像相关方法可测得与载荷对应状态的圆盘全场应变^[12],从而可得到 PBX 圆盘中心的拉伸应力-应变关系。图 4 是室温和加热两种成型温度下 PBX 的拉伸应力-应变曲线。结果表明:室温压制成型 PBX 的破坏拉伸应力较低,为

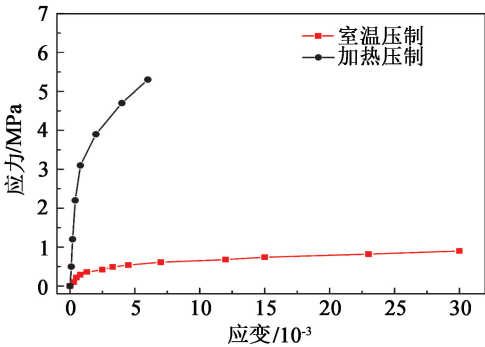


图 4 不同压制温度成型的 PBX 拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve of PBX formed at different pressing temperature

0.9 MPa,破坏应变较大,为 3.0%,拉伸模量为 0.36 GPa;加热压制成型 PBX 的破坏拉伸应力较大,为 5.3 MPa,拉伸模量较高,为 5.00 GPa,但破坏应变相对较小,为 0.6%。对比室温和加热两种温度压制成型试样的破坏应变可知,加热压制成型 PBX 表现出明显的脆性特征。

2.3 压制温度影响 PBX 性能的机理分析

对炸药成型件的基本性能要求是它的密度,密度越高,成型件的尺寸越稳定,特别是退模后在较长存放时间内不会发生体积膨胀等变化,这对炸药成型件的力学性能有重要意义。

所用的 PBX 模拟材料的理论成型密度为 1.901 g/cm³,利用排水法测试了室温压制成型和加热压制成型 PBX 的密度,分别为 1.741 g/cm³ 和 1.829 g/cm³,分别占理论密度的 91.58% 和 96.21%,即室温下压制成型 PBX 的空隙率较大。密度测试结果表明,加热压制成型 PBX 的力学性能明显优于室温压制成型 PBX 的性能,2.2 中测得的拉伸应力-应变结果验证了这一结论。

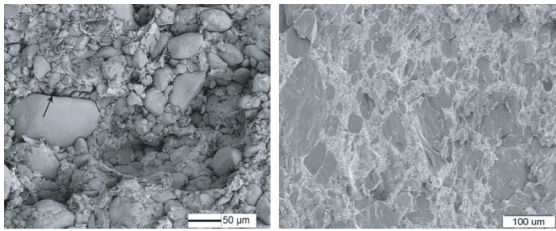
分析压制成型温度的差异对 PBX 力学性能的影响机理。室温压制成型过程中,PBX 造型粉颗粒的压制过程经历 3 个阶段:第一阶段是造型粉颗粒的重排,颗粒流动实现小颗粒填充大颗粒间的空隙,颗粒之间也产生相互挤压和摩擦等作用,但相互作用较弱;随着颗粒间隙的减少,颗粒间的作用力变大,压制进入第二阶段,即颗粒的破碎阶段,颗粒间的空隙进一步由破碎的颗粒填充;在颗粒破碎达到一定程度,完成颗粒间填隙后,压制进入第三阶段,即压实阶段,造型粉颗粒被压制成整体。在室温条件高压成型过程中,包裹在晶体颗粒表面上的黏结剂没有发生软化,一方面会使得颗粒间的空隙很难被黏结剂填充,形成高空隙率;另一方面,颗粒间的黏结性能较弱,导致室温下成型 PBX 的整体强度低,且比较软。

加热压制成型过程中,PBX 造型粉颗粒也经历颗粒重排、颗粒破碎、压实的过程,但重要的是,高温下黏结剂会发生软化,且在上百兆帕压力下黏结剂有较好的流动性。一方面,这会使得晶体颗粒表面包覆的黏结剂能够完全包裹晶体不规则的表面,提高了包覆率;另一方面,流动的黏结剂可以填充造型粉颗粒之间的空隙,降低空隙率。更重要的是,从分子角度看,在高温下黏结剂很有可能被活化,使得这类高分子化合物的分子链变得活跃,表现出更好的伸长特性,分子链之间相互搭接或缠绕,形成整体的分子链网络,更好地增强了 PBX 颗粒之间以及颗粒

和黏结剂界面上的黏合性能,使得 PBX 整体力学性能得到提高,但也增大了 PBX 的脆性。

2.4 不同成型温度条件下 PBX 的破坏模式

图 5(a)是室温压制成型的 PBX 巴西实验后的断面形貌,可看到,试样断面凹凸不平,不仅存在光滑的颗粒表面,而且还有颗粒拔出后留下的凹坑,颗粒-黏结剂的界面脱黏是拉应力作用下室温压制成型 PBX 的主要破坏形式。由于室温条件下黏结剂不发生软化,颗粒间不可避免地存在空隙,如图 5(a)中箭头所示。图 5(b)是加热压制成型 PBX 巴西实验后的断面形貌,可观察到,断面很平整,颗粒周围被黏结剂完好地包裹,拉伸应力作用下加热压制成型 PBX 主要发生颗粒穿晶断裂。对比分析拉伸应力作用下室温和加热两种温度压制成型 PBX 的断面形貌可知,成型温度对 PBX 的细观破坏有重要影响,这也支持了 2.3 中成型温度对 PBX 的性能影响机理分析。



(a) 室温压制 (b) 加热压制

图 5 PBX 断面形貌

Fig. 5 Fracture surface of PBX

3 结论

- 1)对比研究了室温和加热两种温度条件下压制成型的 PBX 炸药装药的内部质量、静态力学性能和细观破坏形式。结果表明,加热压制成型工艺有利于改善装药的内部质量,可避免初始损伤,提高了密度均匀性,降低了空隙率。
- 2)加热压制成型装药的力学性能得到了改善,提高了抗拉强度,一定程度上增强了装药的承受过载能力。
- 3)室温压制成型装药的破坏形式主要是界面脱黏;而加热压制成型装药的主要破坏形式是穿晶断裂。

参 考 文 献

[1] 梁华琼, 韩超, 雍炼, 等. 高聚物黏结炸药的压制成型性[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 44-48.
LIANG H Q, HAN C, YONG L, et al. Pressing mecha-

nism of polymer-bonded explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 44-48.

[2] 庞海燕, 李明, 温茂萍, 等. 温度对 PBX 炸药压制的作用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 21-23.
PANG H Y, LING M, WEN M P, et al. Effects of compaction temperature on pressing of PBX [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(1): 21-23.

[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 H Q, YONG L, TANG C L, et al. Crack and damage of PBX during pressing [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(1): 27-30.

[4] 常双君. 炸药装药质量对发射安全性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(11): 76-78.
CHANG S J. Effect of charging quality on launching safety [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14 (11): 76-78.

[5] 王世英, 胡焕性. 炸药装药工艺对发射安全性的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 20-22.
WANG S Y, HU H X. The effect of different charging processes on the launch safety [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1): 20-22.

[6] 梁华琼, 雍炼, 唐常良, 等. RDX 为基的 PBX 炸药压制过程损伤研究[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 713-716.
LIANG H Q, YONG L, TANG C L, et al. Pressing damage of RDX-based polymer bonded explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(6): 713-716.

[7] 李琳琳, 张欲立, 张宏光, 等. 分步压装药工艺及装药参数的实验研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(10): 33-35.
LI L L, ZHANG Y L, ZHANG H G, et al. Experiment research on procedure press-charge detonator technology and charge parameter [J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(10): 33-35.

[8] 兰琼, 韩超, 雍炼, 等. 低压热处理对 PBX 炸药件密度及内部质量的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 185-187.
LAN Q, HAN C, YONG L, et al. Effects of low-pressure heat treatment on charge density and inner quality of PBX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16 (2): 185-187.

[9] 吕珂臻, 韩超, 高铁榜, 等. 温度对 RDX 基 PBX 压制成型内部质量的影响[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 48-52.

- 2018, 28(12): 65-70.
- [22] 孟亦飞, 董铭鑫, 赵东风, 等. 大尺寸通风管网中障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播特性影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 99-104.
- MENG Y F, DONG M X, ZHAO D F, et al. Numerical simulation on influence of obstacle on propagation characteristics of shock wave caused by gas explosion in large size ventilation pipe network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(2): 99-104.
- [23] 董铭鑫, 赵东风, 尹法波, 等. 通风管网中瓦斯爆炸火焰波传播特性三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊1): 291-299.
- DONG M X, ZHAO D F, YIN F B, et al. Flame propagation characteristics of gas explosion in 3D ventilation pipe network by numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Suppl.1): 291-299.
- [24] LIN B Q, GUO C, SUN Y M, et al. Effect of bifurcation on premixed methane-air explosion overpressure in pipes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 464-470.
- [25] ZHU C J, GAO Z S, LU X M, et al. Experimental study on the effect of bifurcations on the flame speed of premixed methane/air explosions in ducts [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 545-550.
- [26] 叶青, 林柏泉. 受限空间瓦斯爆炸传播特性[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 199-216.
- [27] 景国勋, 贾智伟, 程磊, 等. 复杂条件下瓦斯爆炸传播规律及伤害模型[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 126-137.
- [28] ASTM International. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts: ASTM E1515-14 [S]. ASTM International, 2014.
- [29] TURNS S R. 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 姚强, 李水清, 王宇, 译. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- TURNS S R. An introduction to combustion: concepts and applications [M]. YAO Q, LI S Q, WANG Y, translated. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [30] 丁海平, 陈姚杰, 于彦彦, 等. 复杂地形对平面波散射问题频域解的数值求解方法[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 20-27.
- DING H P, CHEN Y J, YU Y Y, et al. Numerical solution in frequency domain for scattering of plane wave by complex topography [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 20-27.
- [31] WANG K, HAO H Q, JIANG S G, et al. Experimental study on the characteristics of overpressure wave to ventilation facilities during gas explosion and automatic shock relief devices [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2361-2384.
- [32] GAO K, LI S N, LIU Y J, et al. Effect of flexible obstacles on gas explosion characteristic in underground coal mine [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 362-369.

(上接第 23 页)

- LÜ K Z, HAN C, GAO T B, et al. Influence of temperature on internal quality of pressed RDX-based PBX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(1): 48-52.
- [10] 周忠彬. 高聚物粘结炸药宏/细观力学行为及变形破坏研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- ZHOU Z B. Study on macro and micro mechanical behavior and deformation failure of polymer bonded explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012.
- [11] 陈鹏万, 黄风雷, 张瑜, 等. 用巴西实验评价炸药的力学性能[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 533-537.
- CHEN P W, HUANG F L, ZHANG Y, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 533-537.
- [12] ZHOU Z B, CHEN P W, DUAN Z P, et al. Comparative study of the fracture toughness determination of a polymer-bonded explosive simulant [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(17): 2991-2997.