

文章编号: 1006-9941(2015)01-0048-10

温度对 RDX 基 PBX 压制成型内部质量的影响

吕珂臻, 韩超, 高铁榜, 陈学平, 冯立羊, 朱兴虎, 兰琼

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对黑索今(RDX)基高聚物黏结炸药(PBX)压装成型易出现裂纹损伤的问题,利用 X 射线、超声和密度检测等手段研究了压制温度、降温速率和升温速率对 $\phi 60\text{mm}\times 60\text{mm}$ RDX 基 PBX 药柱裂纹影响。结果表明:在药柱压制过程中增加保温,控制药柱冷却温度不低于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率和升温速率不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,可以有效地减少或消除药柱内部裂纹;提高压制温度,有利于提高药柱加工性能,改善炸药质量。

关键词: 工程力学;黑索今(RDX),高聚物黏结炸药(PBX);裂纹;成型;降温速率;升温速率

中图分类号: TJ55; TB33

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.010

1 引言

压装型黑索今(RDX)基高聚物黏结炸药(PBX)传爆药柱是一种晶体颗粒高度填充的非均质多相高分子复合材料,因为其能量高、安全和力学性能好被应用于各种尖端和常规武器中^[1-2]。武器用猛炸药密度要求在其理论密度的 98% 左右,而 RDX 基 PBX 传爆药一般要求密度为理论密度的 90%~92%^[1],因而如何控制 RDX 基 PBX 传爆药柱特别是长径比较大传爆药柱的内部质量,减少传爆药柱的内部裂纹和缺陷成为研究的难点。

国内外关于温度对材料损伤裂纹的形成、演化的理论和实验方面的研究相对广泛和深入,并取得了一些新的研究成果,但是对于 RDX 基 PBX,特别是长径比较大的压装成型 PBX 材料则相对较少。陈鹏万^[3-4]等从细观力学的角度研究了 PBX 材料的力学行为和变形破坏机理,认为 PBX 材料最主要的破坏机理是界面脱粘和黏结剂的成穴失效。庞海燕等^[5-7]研究了温度对模压压制 PBX 的密度和压缩强度的影响,观察到常温压制的药柱的密度和压缩强度明显低于高温压

制的,分析认为高温使造型粉的黏结体系软化,降低了造型粉间的摩擦,从而降低应力梯度。田勇等^[8]研究了 PBX 材料的热冲击和温度循环损伤,实验观察到了 PBX 产生损伤并逐渐积累扩展及至最后破坏的过程。梁华琼等^[9-10]对 RDX 基 PBX 压制过程损伤形成进行研究,认为采取分段保压和控制降温速率的方法可有效抑制炸药件内部损伤,同时证实选择适当的黏结剂对提高 RDX 基 PBX 压制件的成型性能具有重要作用。但是目前关于 RDX 基 PBX 传爆药柱生产和存储等过程前后温度对药柱内部质量特别是大长径比药柱内部质量的影响尚缺少系统研究。

本研究以 RDX 基 PBX 为研究对象,利用不同的模压工艺压制炸药,结合 X 射线、超声及密度检测等手段,探讨了压制温度、降温速率和升温速率对较大长径比 RDX 基 PBX 传爆药柱的内部质量影响。

2 实验

2.1 材料和仪器

RDX 基 PBX 造型粉由化工材料研究所提供,组成为 RDX/高分子黏结剂(95/5)。

工业 X 射线系统, INSTRON-5582 型材料试验机, PM1200 型电子天平; CTS-36 型全数字超声检测仪, HGY-600F 电热油浴恒温箱, MG452 X 射线机。

2.2 实验条件

(1)压制温度实验:采用表 1 的条件在材料试验机上压制 $\phi 60\text{mm}\times 60\text{mm}$ 的炸药柱,并让药柱自然冷却,每组做三发平行实验。

收稿日期: 2013-09-16; 修回日期: 2014-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(11102189)资助

作者简介: 吕珂臻(1985-),男,硕士,助理研究员,主要从事含能材料压制成型及数值模拟研究。e-mail: lkzh100@163.com

通信联系人: 冯立羊(1980-),男,助理研究员,主要从事含能材料压制成型及相关物性研究。e-mail: fy98ren@gmail.com

表 1 RDX 基 PBX 压制成型条件

Table 1 Pressing condition of RDX-based PBX

method	pressure/MPa	temperature/°C	time/min
I	150	15	120
II	150	80	120

(2) 降温速率实验: 采用工艺 II 压制药柱, 在降温速率从 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下研究其对药柱内部质量的影响, 每组做三发平行实验。

(3) 温度冲击实验: 采用工艺 II, 并且降温速率控制为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 压制药柱, 在升温速率从 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下研究其对药柱内部质量的影响, 每组做三发平行实验。

2.3 性能测试

(1) 密度测试: 采用排水法在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水下测试药柱的密度, 测量前将炸药柱放置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温间 24 h, 待达到充分的热平衡后开始测试。

(2) X 射线性能检测: 测试方法参照 GJB59 3.2-1988, 采用 X 射线机对压制成型的药柱内部杂质和裂纹进行探伤检测, 测试的工作电压 450 kV, 工作电流 150 mA。

表 2 不同压制温度下成型 PBX 炸药件密度及成型质量

Table 2 Density and quality of RDX-based PBX specimens pressed at different pressing temperature

sample	pressing method	density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	crack	results
PBX-1a	I	1.668		
PBX-2a	I	1.665	samples surface good and ultrasonic detection showing no crack	drop blocks and fractures in the machining
PBX-3a	I	1.662		
PBX-4a	II	1.698	samples appearance good but ultrasonic detection of PBX-4a showing crack	no blocks and fractures in the machining
PBX-5a	II	1.702		
PBX-6a	II	1.703		

从表 2 可以看出, 采用方法 I 压制的 PBX-1a, PBX-2a, PBX-3a 药柱表面状况良好无裂纹, 经超声探伤内部无裂纹, 但是在加工过程中出现了药柱掉块、分层, 表明药柱力学性能差, 无法加工成型。采用方法 II 压制的 PBX-4a, PBX-5a 和 PBX-6a 药柱相比常温压制的药柱内部质量有了明显改善, 表面无肉眼可见裂纹, 进行加工处理未出现药柱掉块、分层现象。但经超声探伤 PBX-4a 药柱内部在探深为 31.2 mm 处有横向裂纹 (图 1), 说明提高压制温度可以改善较大长径比炸药柱的加工性能, 而药柱内部出现的内部横向裂纹主要是由于药柱成型的环境温度较低 ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而炸药造型粉温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温差较大, 在自然冷却过程中由于降温过快, 产生的药柱热应力超过 RDX 基 PBX

(3) 超声性能检测: 测试方法参照 GJB59 3.1-1988, 采用超声探头型号 123M33, 探头频率 2.5 MHz, 晶片尺寸 $\Phi 10\text{mm}$, 耦合剂为水, 耦合面为试样端面。

3 结果与分析

3.1 压制温度对药柱成型内部质量的影响

实验采用不同压制温度压制 $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ RDX 基 PBX 药柱, 采用的工艺条件见表 2, 实验结果如图 1 所示。

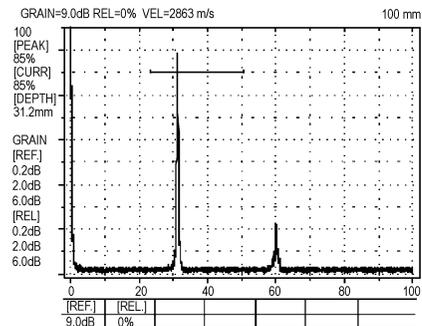


图 1 PBX-4a 药柱超声检测波形 (检测波形显示内部裂纹)

Fig. 1 Ultrasonic detection wave of PBX-4a specimens with inner cracks

材料的强度极限而产生了内部裂纹。

同时, 由表 2 可知, 高温 (方法 II, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 压制的 PBX-4a, PBX-5a, PBX-6a 药柱密度比常温压制的药柱密度高 3.0% 左右, 主要是由于高温有利于 PBX 黏结体系的软化^[5], 减少成型过程中的内摩擦, 从而降低 PBX 在成型过程中压力梯度, 提高药柱密度。

3.2 降温速率对药柱成型内部质量的影响

实验采用不同的保温措施, 将压制后的 $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ RDX 基 PBX 药柱放置于恒温箱内, 通过不同降温速率使药柱冷却至室温, 再将其取出后退模。实验条件与结果见表 3 与图 2。从图 2 可以看出, $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 药柱裂纹随降温速率的减小和冷却温度的提高而减少。降温速率为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 PBX-1b,

PBX-2b, PBX-3b 三发药柱在压制保压和冷却过程中未采取任何保温措施, 经 X 射线检测内部均有横向裂纹, 而降温速率为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 PBX-4b, PBX-5b, PBX-6b 号药柱在压制保压和冷却的过程中, 通过采取保温措施, 使药柱的冷却温度提高到 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与 PBX-1b, PBX-2b 和 PBX-3b 号药柱相比, 性能有一定改善, 表面无肉眼可见裂纹, 但是其内部经 X 光检测有两发药柱存在横向裂纹, 说明 PBX-4b, PBX-6b 炸药柱应力还未释放完全, 但与 PBX-1b, PBX-2b 和 PBX-3b 号药柱相比有所减小。主要原因可能是药柱成型的环境温度较低, 只有 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而炸药造型粉有 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温差较大, 并且造型粉温度降得过快, 致使药柱在压制过程中内部产生了较大热应力, 退模后, 由于热应力超过了药柱轴向抗拉强度, 导致药柱内部产生了横向裂纹。

而对 PBX-7b, PBX-8b, PBX-9b 号药柱在压制保压和冷却的过程中, 除在压制过程采取保温措施, 还控制降温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, 与之前药柱相比, 药柱表面状况有所改善, 经 X 光检测药柱内部无裂纹, 说明提高冷却温度和降低降温速率有利于减少药柱内部应力

表 3 不同降温速率下成型的 RDX 基 PBX 炸药件质量

Table 3 Quality of RDX-based PBX specimens pressed at different cooling rate

sample	pressing method	heat preservation	temperature/ $^{\circ}\text{C}$	cooling rate/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	results
PBX-1b					
PBX-2b	II	no	25	20	samples surface good but X-ray detection showing crack
PBX-3b					
PBX-4b					
PBX-5b	II	yes	45	20	samples surface good but X-ray detection of PBX-4b and PBX-6b showing crack
PBX-6b					
PBX-7b					
PBX-8b	II	yes	45	5	X-ray detect showing no crack
PBX-9b					

3.3 升温速率对药柱成型内部质量的影响

药柱在使用、运输、库存期间常受到一定温度冲击, 实验未采用均匀温度梯度, 仅研究了关心的几个升温速率对压制药柱内部裂纹的影响。实验药柱经过超声检测均无裂纹, 热冲击实验采用的工艺条件和实验结果列于表 4 和图 3。从表 4 和图 3 可以看出, 以升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 加热至 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 20 min 后以自然降温的 PBX-5c (5#) 药柱表面质量良好, 经过超声检测, 药柱内部质量良好, 内部无纵横交错的裂纹。而在升温速率分别为 $10, 15, 20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 PBX-1c (1#)、PBX-2c (2#)、PBX-3c (3#), 其它同样处理的三发药柱

和药柱裂纹缺陷, 从而改善了药柱成型质量。

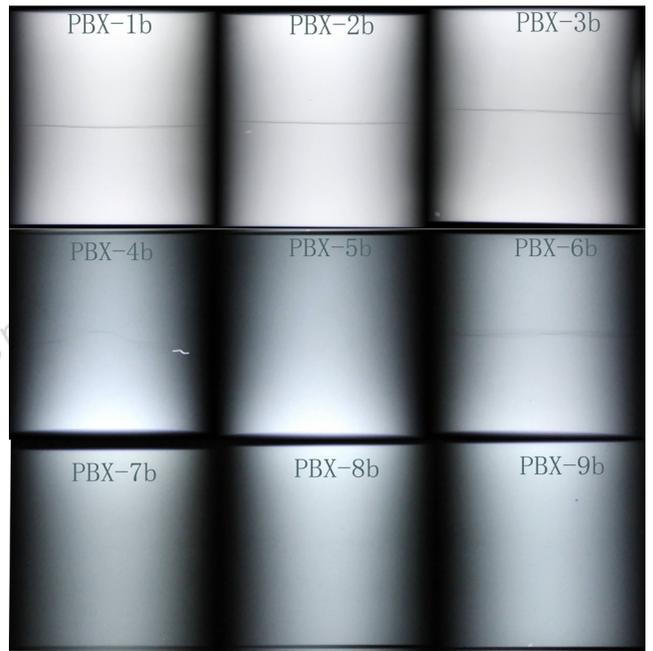


图 2 $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的 RDX 基 PBX 药柱 X 射线图

Fig. 2 X-ray photographs of different RDX-based PBX specimen with $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$



图 3 不同升温速率冲击下的 RDX 基 PBX 压制药柱

Fig. 3 RDX-based PBX specimen pressed at different heating rate

有肉眼可见横向细裂纹,并且随着升温速率的增加,裂纹由于宽度增加而变得更明显。以升温速率为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 加热至 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 20 min 后以自然降温的 PBX-4c(4[#]) 药柱中部位置出现了一条明显的宏观横向贯穿裂纹导致药柱断裂。主要原因可能是由于在高温热冲击作用下,样品内部的热应力增加,引起试样内部初始裂纹损伤进一步扩展、汇集及贯穿而形成宏观裂纹,同时宏观裂纹的端部又因应力集中而出现新的裂纹,如此不断反复,使得药柱最终发生断裂。

表 4 不同升温速率下成型的 RDX 基 PBX 炸药件质量

Table 4 Quality of pressed RDX-based PBX specimens at different heating rates

sample	heating rate / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	heat preservation time/min	highest temperature / $^{\circ}\text{C}$	results
PBX-1c(1 [#])	10	20	75	a fine crack in samples surface
PBX-2c(2 [#])	15	20	75	a fine crack in samples surface
PBX-3c(3 [#])	20	20	75	a fine crack in samples surface
PBX-4c(4 [#])	30	20	75	open transverse cracks in samples surface
PBX-5c(5 [#])	5	20	75	good and ultrasonic detection showing no crack

4 结 论

(1) 提高压制温度可以改善大长径比 RDX 基 PBX 药柱的加工力学性能。实验压制的 $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ RDX 基 PBX 药柱的温度从 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,药柱在加工过程中未出现掉块、分层现象,药柱力学性能得到提高,加工性能得到改善。

(2) 降温速率过快是形成较大长径比 RDX 基 PBX 药柱内部质量缺陷的关键影响因素之一。在实验降温速率大于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,冷却温度低于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, $\Phi 60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ RDX 基 PBX 药柱容易形成内部裂纹,因此提高冷却温度和降低成型后药柱的降温速率可以减少药柱内部裂纹缺陷,改善药柱质量。

(3) 升温速率大于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 容易造成大长径比 RDX 基 PBX 药柱内部形成新的裂纹缺陷,甚至造成药柱直接断裂,为保证药柱在运输、存储过程中产品质量,应避免药柱受到大的热冲击而形成新的裂纹损伤缺陷。

致谢:对杨占锋在超声检测方面的工作及徐程洪、张在新在压制实验方面的工作,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 董海山. 炸药及相关物性能[M]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2005: 72.
DONG Hai-shan. Properties of explosive and relevant material [M]. Mianyang:China Academy of Engineering physics, 2005:72.
- [2] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. Studies of the failure mechanisms of polymer bonded explosives by high resolution Moiré interferometry and environmental scanning electron microscopy [C]//Proceedings of 11 th Symposium on Detonation, Snowmass, UT, 1998: 66.
- [3] 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.
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
- [4] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79.
LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79.
- [5] 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.
PANG Hai-yan, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Mechanical effects of compaction temperature on pressing of PBX [J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2011, 34(1): 21.
- [6] 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.
ZHANG Wei-bing, WEN Mao-ping, TIAN Yong, 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.
- [7] 兰琼, 韩超, 雍炼, 等. 温压时效处理对 PBX 炸药件密度及内部质量的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 185.
LAN Qiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Effects of low-pressure heat treatment on charge density and inner quality of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 185.
- [8] 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.
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.
- [9] 梁华琼, 雍炼, 唐常良. 等. RDX 为基的 PBX 炸药压制过程损伤形成研究[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 713.
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Pressing damage of RDX-based polymer bonded explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 713.
- [10] Robert A J, John S S, Louis M C, et al. Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B2): 1889-1900.

Influence of Temperature on Internal Quality of Pressed RDX-based PBX

Lü Ke-zhen, HAN Chao, GAO Tie-bang, CHEN Xue-ping, FENG Li-yan, ZHU Xing-hu, LAN Qiong

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: To solve the cracks in the pressing process of RDX-based PBX (polymer bonded explosive), the influence of pressing temperature, cooling rate and heating rate on quality of $\Phi 60$ mm \times 60 mm RDX-based PBX were studied with ultrasonic, X-ray, and density detection. Results show that the number of cracks in the PBX diminish or eliminate when the cooling temperature is higher than 45 °C, and the cooling and heating rates are less than 5 °C \cdot h⁻¹ in compaction process. Moreover, increasing pressing temperature improves the machining and pressing quality of the PBX.

Key words: engineering mechanics; RDX; polymer bonded explosive (PBX); cracks; pressing; cooling rate; heating rate

CLC number: TJ55; TB33

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.010



读者·作者·编者

《含能材料》"观点"征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了"观点"栏目。"观点"栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》固体推进剂专栏征稿

高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活能量管理和高可靠性成为当前固体推进剂面临的紧迫课题,为促进其研究,本刊将于2015年开设推进剂研究专栏,以专题报道固体推进剂研究的最新研究进展。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部