

文章编号:1006-9941(2009)04-0412-03

## 高聚物粘结炸药温湿度载荷加速老化试验研究

颜熹琳, 李敬明, 周 阳, 李 明, 周筱雨

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**在 5 MPa 的轴向压应力条件下对高聚物粘结炸药进行了温湿度试验,结果表明,高聚物粘结炸药在温湿度载荷三种环境因素的共同作用下,模量和破坏强度都发生了比较明显的变化。高聚物粘结炸药经过 45 °C、65% RH、5 MPa 的温湿度载荷多因素老化试验后,密度基本不变,但是当其经过 60 °C、80% RH、5 MPa 的老化试验后,密度下降比较明显。温湿度载荷多因素老化试验后,模量和破坏强度在老化初期下降都比较明显,但是随着时间的延长,模量和破坏强度变化都不明显。

**关键词:**物理化学; 高聚物粘结炸药(PBX); 载荷; 多因素加速老化; 力学性能

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.009

### 1 引 言

高聚物粘结炸药是一种颗粒填充高分子复合材料<sup>[1-2]</sup>,其力学性能与安全性能密切相关<sup>[3-5]</sup>。但在贮存和使用过程中,由于受温湿度和载荷等各种因素的综合作用,性能会逐渐变坏。因此,关于这种材料在机械和热应力作用下的性能研究日益广泛。特别地,针对温度环境对炸药环境适应性的影响,国内外开展了不少研究。杨国满<sup>[6]</sup>等人曾应用时间温度叠加原理研究了时间和温度对不同高聚物粘结炸药性能的影响规律,探索时间温度叠加原理在研究高聚物粘结炸药力学性能方面的应用。田勇<sup>[7]</sup>等人研究了热冲击温度差与试样损伤破坏率、密度变化以及超声波参量之间的相关性。李敬明<sup>[8]</sup>等对 TATB 基高聚物粘结炸药进行过热循环试验后的尺寸、力学性能及爆轰性能变化研究。许光<sup>[9]</sup>等研究了温度渐变环境下混合炸药的环境适应性。温茂萍<sup>[10]</sup>等研究了 PBX 平面应变断裂韧度随温度的变化规律。Johnson<sup>[11]</sup>研究了 Bartherm 处理对 PBX 力学性能的影响。Wiegand<sup>[12]</sup>和 Gray<sup>[13]</sup>的研究表明,PBX 的抗压强度和压缩弹性模量随应变率的增加而增加,随温度的升高而降低,但温度和应变率的变化只引起临界压缩应变的微小改变。但是上述研究未涉及炸药带有载荷的多因素加速老化研究。为了掌握高聚物粘结炸药在多因素加速老化条件下的性能变化规律,本研究设计了炸药柱在存在轴向

载荷条件下的温湿度老化试验,并对试验后炸药的密度和力学性能变化规律进行了分析。

### 2 试 验

#### 2.1 样 品

本试验用的样品是以奥克托今为基的高聚物粘结炸药,并含有部分钝感炸药 TATB 和少量的 TNT 作为增塑剂。试验用样品规格为  $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm 的小药柱。小药柱由模压成型的  $\Phi 280$  mm  $\times$  60 mm 的大药饼经机械加工而成。

#### 2.2 试验方案设计

将高聚物粘结小药柱五发一组在恒定压应力加载装置上进行加载,加载装置如图 1 所示。加载压应力大小为 5 MPa,并进一步对装有药柱的加载装置放入可调温湿度试验箱内进行多因素加速老化试验。

温湿度试验条件有两种,分别为 45 °C、65% RH 和 60 °C、80% RH。老化 30 d、60 d 和 90 d 后取出样品对其密度和力学性能进行测试,研究炸药在不同温湿度载荷条件下的老化规律。

#### 2.3 性能测试

采用“液体静力称量法”测定密度,测量精度为  $0.001 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。采用 INSTRON 材料试验机测试力学性能,测试标准为 GJB772A-97 方法 418.1,测试温度为  $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ ,加载速率为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 密度变化

为了消除样品密度差异的影响,选取了密度相同(密度均为  $1.849 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )的小药柱进行试验。

收稿日期:2009-01-09;修回日期:2009-04-23

基金项目:中国工程物理研究院预先研究项目(426040401)

作者简介:颜熹琳(1982-),女,研究实习员,从事炸药和高分子材料的环境试验和性能表征。

经过相同压缩加载应力(5 MPa)和不同温湿度、不同老化时间后样品密度的变化情况见表 1。共进行六组实验,每组实验为五发样品,表 1 中数据均为五发样品测试结果的平均值。

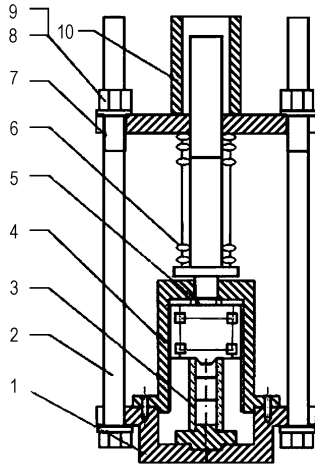


图 1 加载装置示意图

1—底座, 2—支撑杆, 3—试样, 4—防护套, 5—定位轴, 6—弹簧, 7—限制盖, 8—限位螺母, 9—垫片, 10—加载套

Fig. 1 The sketch drawing of the load equipment

1—base, 2—stand bar, 3—test sample, 4—lagging, 5—locating shaft, 6—elastic spring, 7—restriction cover, 8—spacing nut, 9—gasket, 10—load cannula

表 1 多因素老化试验后高聚物粘结炸药的密度变化

Table 1 Density changes of PBX after the multi-factor aging tests

aging conditions	aging time /d	density after aging tests /g · cm <sup>-3</sup>
45 °C ,65% ,5 MPa	30	1.849 ± 0.001
	60	1.849 ± 0.001
	90	1.848 ± 0.001
60 °C ,80% ,5 MPa	30	1.846 ± 0.001
	60	1.838 ± 0.001
	90	1.841 ± 0.001

由表 1 可见,样品经过长时间 45 °C、65% RH、5 MPa 的温湿度载荷多因素加速老化后,其密度基本不变。而当其经过长时间 60 °C、80% RH、5 MPa 的温湿度载荷多因素加速老化以后,密度下降比较明显。由此可见,当载荷不变(5 MPa)时,若温湿度条件更严酷,高聚物粘结炸药的密度变化就更大。

但是,从表 1 中还发现,样品在 60 °C、80% RH、5 MPa 条件下老化 90 d 后,与其在相同条件下老化 60 d 相比,密度反而有所回升。分析认为,影响高聚物粘结炸药密度的因素主要有两个:一是因为高聚物粘

结炸药内部存在一定的微孔隙和微损伤<sup>[8]</sup>,在压应力载荷的作用下,高聚物粘结炸药被压实,从而导致其密度的增加。二是因为高聚物粘结炸药在温度作用下,内部的 TNT 挥发导致密度降低。以上两个因素互相竞争最终引起密度的变化。由于在老化初期高聚物粘结炸药内部的 TNT 挥发速率较快,而且随着老化时间的延长,TNT 挥发得越多,致使密度减小值远大于密度增加值,所以在温湿度载荷老化初期(0~60 d,炸药的密度降低,而且随着时间的延长,密度降低得更多。但是,随着老化时间的进一步延长(老化 90 d,炸药内部的 TNT 挥发速率减小,而在压应力载荷的作用下,使炸药密度增大的因素仍在持续作用,所以老化时间进一步延长到 90 d 后,高聚物粘结炸药的密度反而有所回升。

### 3.2 力学性能

压应力加载为 5 MPa,样品在不同温湿度加速老化后的常温压缩性能变化情况见表 2。表 2 中试验数据均为五发样品试验结果平均值。

表 2 多因素老化试验后高聚物粘结炸药的力学性能变化  
Table 2 Mechanical properties changes of PBX after the multi-factor aging tests

states	aging time /d	modulus /GPa	compressive strength/MPa
original	0	14.70 ± 0.22	46.04 ± 0.28
	30	9.61 ± 0.59	38.13 ± 1.25
	60	10.29 ± 0.32	38.26 ± 0.41
45 °C ,65% ,5 MPa	60	11.12 ± 0.22	40.18 ± 1.26
	30	10.07 ± 0.25	36.91 ± 0.20
	60	11.04 ± 1.16	32.89 ± 4.51
60 °C ,80% ,5 MPa	60	10.99 ± 3.62	36.22 ± 1.37

从表 2 可知,经过温度、湿度和压应力加载多因素加速老化后,高聚物粘结炸药的模量和破坏强度均明显降低,而且,在表 2 中所列的两种老化条件下,随着老化时间的延长(老化时间达到 60 d 和 90 d),炸药的模量和破坏强度均趋于稳定。但是,60 °C、80% RH、5 MPa 老化条件下较 45 °C、65% RH、5 MPa 老化条件下,炸药的破坏强度下降更明显。

分析认为,高聚物粘结炸药在压制成型过程中易产生微损伤。这些微损伤包括塑性变形、炸药颗粒断裂、炸药与粘结剂界面脱粘及成型过程中产生的残余应力等<sup>[14]</sup>。高聚物粘结炸药内部的这些微损伤在温度、湿度和压应力载荷三个因素的共同作用下都可能出现一定程度的扩张,从而引起炸药模量的减小和破坏强度的降低。

因为损伤扩张到一定程度后将趋于稳定,因此,在

温湿度载荷加速老化初期,破坏强度明显降低,而随着老化时间的延长,破坏强度下降到一定程度后就基本趋于稳定了。

压缩弹性模量主要反映材料的轴向加载初始阶段的力学响应。分析认为影响模量变化有两个主要的因素:第一,炸药在温湿度载荷老化后轴向损伤增加引起模量变小。第二,在压应力载荷的作用下,炸药内部的微孔隙逐渐变小,从而引起模量增加。这两个因素共同作用最终决定高聚物粘结炸药的模量变化。如上所述,在加速老化初期,炸药内部的微损伤增加引起模量明显下降。尽管微孔隙在载荷作用下变小引起模量增加,但是前者远大于后者,所以加速老化初期(老化30 d)炸药的模量与老化前相比下降明显。随着老化时间的延长,轴向损伤增加到了一定程度后变化幅度越来越小,但是在载荷压应力的作用下内部微孔隙仍在持续变小,最后使损伤增加引起的模量减小量与内部微孔隙变小引起的模量增加量持平,所以老化时间延长到60 d甚至90 d后,炸药的模量变化不再明显。

#### 4 结 论

(1) 高聚物粘结炸药经过45℃、65%RH、5MPa的多因素老化试验后,密度基本不变;但经过60℃、80%RH、5MPa的老化试验后,密度下降比较明显,且随着老化时间的进一步延长(老化90 d)密度有所回升。

(2) 高聚物粘结炸药经过45℃、65%RH、5MPa和60℃、80%RH、5MPa两种条件下的多因素老化试验后,模量和破坏强度在老化初期下降都比较明显,但随着老化时间的延长,两者都趋于稳定。

#### 参考文献:

- [1] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社,1989.
- [2] 黄辉,王晓川. 偶联剂在HMX基浇注固化炸药中的作用[J]. 含能材料,2000,8(1): 13-17.  
HUANG Hui, WANG Xiao-chuan. Behavior of coupling agent in HMX2 based extrudable cast explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2000,8(1): 13-17.
- [3] 朱建士,陈裕泽. 核装置研制中的力学问题[C]//中国工程物理研究院科技创新论文集(第一辑). 四川 绵阳,2001: 65-72.  
ZHU Jian-shi, CHEN Yu-ze. Mechanical problems in developing nuclear device [C] // Proceedings of Scientific Innovation Forum of Chinese Academy of Engineering Physics ( I ). Mianyang, Sichuan, 2001: 65-72.
- [4] Goldrein H T, Rae P J, Palmer J P, et al. Ageing effectson the mechanical properties of a polymer bonded explosive [ M ] // ISBN 0306464772, Springer, Cavendish Laboratory: Mallinson, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001: In Ageing studies and lifetime extension of materials.
- [5] Kass J. Enhanced surveillance program FY1998 accomplishments [R]. UCRL-LR-13204: 1998. 10.
- [6] 杨国满,胡晓棉. 时间温度效应与塑料粘结炸药的力学性能[J]. 火炸药学报,2004,27(1): 5-8.  
YANG Guo-man, HU Xiao-mian. The time-temperature shift factors and the mechanical properties of explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2004,27(1): 5-8.
- [7] 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): 174-177.  
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2004,12(3): 174-177.
- [8] 李敬明,温茂萍,黄毅民. 热循环对TATB基高聚物粘结炸药性能的影响研究[J]. 含能材料,2005,13(4): 208-210.  
LI Jing-ming, WEN Mao-ping, HUANG Yi-min. Effect of thermal cycling test on the properties of TATB based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2005,13(4): 208-210.
- [9] 许光,吴承云,于荫林,等. 混合炸药对温度渐变环境的适应性研究[J]. 火炸药学报,1997(1): 15-19.  
XU Guang, WU Cheng-yun, YU Yin-lin, et al. Research the adaptability of composite explosives for gradually changing temperature environment [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,1997(1): 15-19.
- [10] 温茂萍,庞海燕,田勇,等. PBX平面应变断裂韧度随温度的变化规律[J]. 火炸药学报,2005,28(3): 63-65.  
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TIAN Yong, et al. Regulations of plane strain fracture toughness of PBX changed with temperatures [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2005,28(3): 63-65.
- [11] Johnson H D. The effects of thermal age to the mechanical properties of RX-03-BB [ J ]. *Mason and Hanger-Silas Mason Co. , Inc. , Amarillo, Tex. ( USA )*. MHSMP-76-15B,1976.
- [12] Wiegand D A. Mechanical properties and mechanical failure of composite plastic bonded explosives and other energetic materials [ C ] // Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1988: 85-88.
- [13] Gray III G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High- and low-strain rate compression properties of several energetic material composites as a function of strain rate and temperature [ C ] // Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass. Los Alamos National Lab. , NM ( United States ), 1988: 229-231.
- [14] 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): 212-222.  
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng, CHEN Li. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials [J]. *Advance In Mechanics*,2002,32(20): 212-222.

(下转419页)

研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(1): 9-11.

RAO Guo-ning, CHEN Wang-hua, HU Yi-ting, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives[J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(1): 9-11.

[14] 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: 386-388.

[15] 王晓峰, 赵省向. 战术战斗部用炸药[M]. 西安: 中国兵器工业第二零四研究所, 2003: 72-73.

## Characteristic of Energy Output of Underwater Explosion for Dual Explosive Charge

NIU Yu-lei, WANG Xiao-feng, YU Ran

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** By choosing two types of explosives GH-1 and GUHL-1, and two typical dual charge structures, the test samples were prepared. The characteristics of energy output of underwater explosion for dual explosive charge were studied and compared with that of the single explosive charge. The results show that under the same composition, the dual explosive charge can change the explosion load near the testing point, and decrease the energy loss of shock wave in the detonation propagation. By using dual explosive charge structure with a non-ideal explosive as an inner core surrounded by a high detonation velocity explosive, the bubble energy is increased by 22.4% compared with that of the single explosive charge, and also energy coupling exists in the two parts of the charge.

**Key words:** explosion mechanics; underwater explosion; dual explosive charge; energy output; energy coupling

(上接 414 页)

## Temperature-humidity-load Accelerating Age Tests of PBX

YAN Xi-lin, LI Jing-ming, ZHOU Yang, LI Ming, ZHOU Xiao-yu

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

**Abstract:** The temperature-humidity environmental tests under 5 MPa axial compression stress were applied to polymer bonded explosive (PBX). Results show that the mechanical properties of the explosive change obviously after the tests. The explosive density has no change under the conditions of 45 °C, 65% RH, 5 MPa, while it decreases obviously under the conditions of 60 °C, 80% RH, 5 MPa. In addition, the modulus and the compressive strength all decrease obviously in the early aging time after the temperature-humidity-load accelerating age tests, but they have no obvious change as the aging time goes on.

**Key words:** physical chemistry; polymer bonded explosive (PBX); load; multi-factor accelerating age; mechanical property