

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.008

老化对含铝温压炸药爆速及力学性能影响的研究*

吴德俊^① 陈 愿^① 徐 森^{①②} 刘大斌^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 为研究高低温老化试验对含铝温压炸药性能的影响,对样品进行了质量变化和抗压强度的研究,并采用电测法测试含铝炸药在高低温试验前后的爆速。研究表明:样品的质量随高低温老化时间的增加而减少;老化试验前样品的爆速为 6 685 m/s,老化 14 d 及 28 d 后爆速分别为 6 590 m/s 和 6 799 m/s,爆速并未发生显著的变化;老化试验前样品的抗压强度为 5.694 MPa,老化试验 14 d 及 28 d 后未经处理样品的抗压强度为 9.110 MPa 和 9.615 MPa,处理后的样品抗压强度为 6.523 MPa 和 6.717 MPa,处理后的样品抗压强度低于未处理样品,对样品进行处理能显著减缓抗压强度的增加。

[关键词] 老化试验;爆速;抗压强度;力学性能

[分类号] TQ564;TD235.2⁺¹

引言

温压炸药(thermobaric explosive,简称 TBE)是近些年发展起来的一种新型炸药,它利用爆炸后形成的冲击波压力效应、热效应及消耗大量氧气形成的窒息效应对目标造成毁伤^[1]。与传统炸药相比,温压炸药中由于高能金属添加剂的加入,具有高爆热、高爆温及爆轰反应时间长的特点^[2],尤其高能金属铝粉作为添加剂应用到温压炸药中,成为各国研究人员研究的对象。温茂萍等^[3-4]对高温老化后炸药的力学性能进行测试,结果表明经过高温老化试验炸药的抗压强度等力学性能随老化时间增加呈现减小趋势。李敬明等^[5]通过热循环试验对 TATB 基高聚物黏结炸药尺寸进行研究,结果表明 TATB 基高聚物黏结炸药在热循环后尺寸变大。黄亚峰等^[6]对老化后 HMX/RDX 基含铝炸药的爆速性能进行研究,结果表明样品爆速随着老化时间的增长没有明显变化。本文通过对温压炸药样品进行高低温-湿度变化的环境刺激,研究环境刺激前后,温压炸药爆速及力学性能的变化。

1 试验部分

1.1 试验样品

将铝粉、RDX、高氯酸铵(AP)、黏结剂和钝感剂按照一定比例制成混合炸药,压装成圆柱形样品,尺寸为 $\varnothing 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。为了研究表面处理对试验

结果的影响,对样品进行了对比处理:1)在样品表面漆抹沥青,进行表面处理;2)不作处理,直接用药柱进行试验。样品照片见图 1。

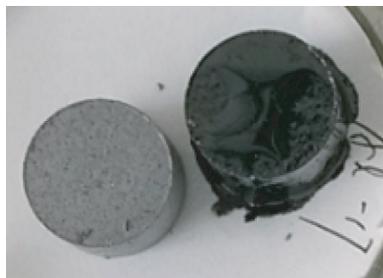


图 1 处理样品和未处理样品对比

Fig. 1 Comparison of untreated and treated samples

1.2 试验内容

1.2.1 高低温老化试验

高低温老化试验条件如图 2(图中所示为老化试验一个周期内试验温度与储存时间的变化关系),高温 71 $^{\circ}\text{C}$ 时保持试验环境相对湿度 95%;试验分 2 个周期,每个周期为 14 d,总计 28 d,在每个周期结束后,将样品取出进行性能测试。

1.2.2 爆速测试

用 10 g 钝化 RDX 作为传爆药柱,采用电测法对样品的爆速进行测试,每个样品平行测试 2 组,取平均值。爆速测试图如图 3。

* 收稿日期:2014-10-26

作者简介:吴德俊(1989~),男,硕士,主要从事含能材料的安全性能研究。E-mail:wudejun2011@126.com

通信作者:刘大斌(1963~),男,博士,主要从事含能材料研究。E-mail:dabin63@vip.sina.com

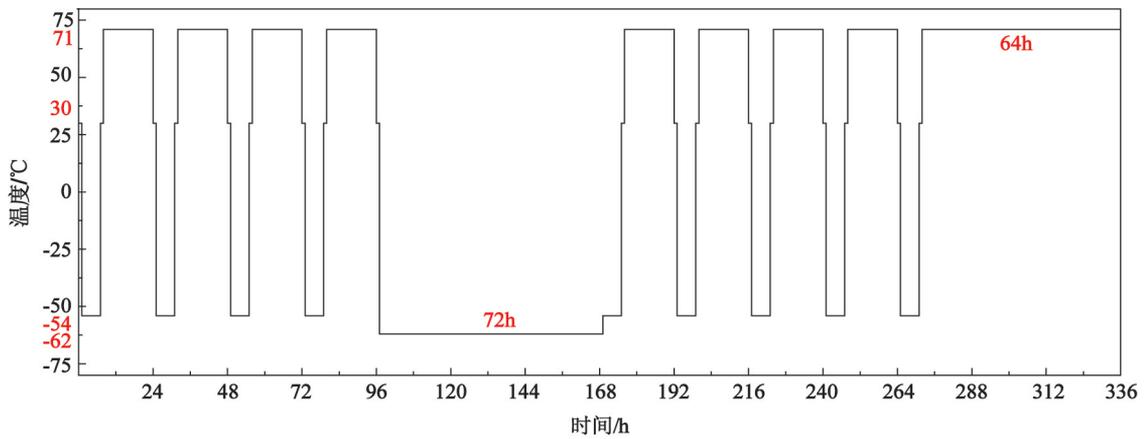
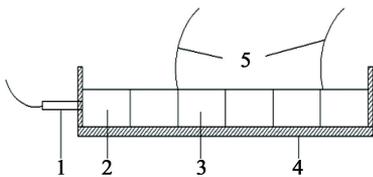


图2 高低温老化试验温度变化程序

Fig. 2 Temperature program of aging test with high and low temperature



(a)



(b)

1 - 雷管; 2 - 传爆药柱; 3 - 样品; 4 - 木托子; 5 - 探针

图3 爆速测试示意图

Fig. 3 Test of detonation velocity

1.2.3 抗压性能测试

按 GJB 772A—1997^[7] 方法 416.1 进行抗压强度测试。将试样置于材料试验机上、下压板间,施加压力,至试样出现裂纹或破坏,其单位横截面积上所能承受的最大负荷即为抗压强度。每组样品平行测试 4 组,抗压强度按式(1)计算,取平均值。

$$\sigma_{bi} = F_i / \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad (1)$$

式中: σ_{bi} 为第 i 个试验样品的抗压强度, Pa; F_i 为第 i 个试验样品遭受破坏时承受的最大负荷, N; d_i 为第 i 个试验样品的直径(直径均取 0.02 m)。

2 结果与讨论

2.1 表面变化

对高低温老化后样品表面进行跟踪记录,实物如图 4 所示。从图 4 可知,在高低温及湿度条件刺激下,未处理样品的表面有明显的渗油现象,伴随有白色晶体析出;经过处理的样品表面没有白色晶体

析出。这表明:对样品进行表面处理,可较好地避免高低温与湿度刺激对样品表面性能带来的影响,通过沥青漆的包裹,使样品与外界不能直接接触,达到保持样品原有性能的效果。



(a) 14 d



(b) 28 d



(c) 未处理样品 14 d 表面放大图

图4 高低温试验前后样品表面观图

Fig. 4 Sample appearances after aging test with high and low temperature

2.2 质量变化

表1为对老化试验前后样品的质量、尺寸进行研

表 1 高低温老化试验前后质量、高度损失

Tab. 1 Mass loss and height change of the samples after aging test with high and low temperature

| 储存 时间 /d | 样品 | 老化前 | | | 老化后 | | | 变化率/% | |
|----------------|-----|----------|-----------|--------------------------------|----------|-----------|--------------------------------|----------|-------|
| | | 质量/ g | 高度/ mm | 密度/ (g · cm ⁻³) | 质量/ g | 高度/ mm | 密度/ (g · cm ⁻³) | 质量 | 高度 |
| 14 | 未处理 | 11.464 8 | 20.44 | 1.78 | 11.463 1 | 20.40 | 1.79 | -0.014 8 | -0.19 |
| | 处理 | 11.672 5 | 20.68 | 1.79 | 11.615 3 | 20.62 | 1.79 | -0.490 0 | -0.27 |
| 28 | 未处理 | 11.403 1 | 20.27 | 1.79 | 11.380 6 | 20.14 | 1.80 | -0.197 0 | -0.64 |
| | 处理 | 11.660 7 | 20.55 | 1.81 | 11.603 3 | 20.41 | 1.81 | -0.490 0 | -0.68 |

究后得到的每组样品质量及高度的平均值。

由表 1 可以看出,高低温循环试验 14 d 后,未经处理的样品的质量变化率为 -0.014 8%,高度变化率为 -0.19%;循环试验 28 d 后,质量变化率为 -0.197 0%,高度变化率为 -0.64%,随着高低温循环试验时间的延长,样品的质量逐渐减少、高度逐渐降低^[8]。在高低温循环试验前后,处理过的样品质量与高度并没有明显变化规律,是由于在药柱表面涂抹沥青漆的质量与厚度无法精确控制,而沥青漆本身在试验过程中,同样作为一个被研究对象,这使得老化后样品的质量与高度受沥青漆的影响较大。从表 1 可得,样品的质量、高度变化率均小于 1%^[9],与美军标 MIL-STD—1751 中关于炸药药柱在环境试验条件下物理性能变化的评价标准相符。

2.3 爆速变化

爆速试验结果见表 2。由表 2 可知,老化试验前样品的爆速为 6 685 m/s,14 d 与 28 d 后,未处理样品的爆速分别为 6 590 m/s、6 799 m/s,处理后的样品爆速分别为 6 601 m/s、6 693 m/s。试验前后样品爆速变化率均在 2% 之内,没有发生显著变化,炸药的爆速没有受到老化试验的影响。

表 2 样品爆速试验结果

Tab. 2 Results of detonation velocity test

| 储存 时间/d | 样品 | 密度/ (g · cm ⁻³) | 探针距 离/mm | 爆速/ (m · s ⁻¹) | 变化率/ % |
|------------|-----|--------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| 0 | 未处理 | 1.790 | 60.83 | 6 685 | 0 |
| 14 | 未处理 | 1.804 | 60.29 | 6 590 | -1.42 |
| | 处理 | 1.795 | 62.05 | 6 601 | -1.26 |
| 28 | 未处理 | 1.806 | 60.17 | 6 799 | 1.71 |
| | 处理 | 1.810 | 61.25 | 6 693 | 0.12 |

2.4 抗压性能

对样品高低温老化试验前后的抗压性能进行测试,结果见表 3。

炸药装药成型^[10]过程中,炸药颗粒在施加的外界压力作用下,相互之间经过错动和挤压变得密实,

炸药颗粒与其他组分之间的孔隙减小,最终产生塑性形变,被压制成型,在炸药中添加黏结剂,使炸药颗粒与其他组分粘结得更加密实,提高炸药的力学性能,使其更容易压制成型。

从表 3 可知,试验前样品的抗压强度为 5.694 MPa,老化 14 d 和 28 d 后未处理过的样品抗压强度为 9.110 MPa、9.615 MPa,处理过的样品的抗压强度为 6.523 MPa、6.717 MPa。随着老化时间的增加,样品的抗压强度都呈现增长的趋势;经过处理的样品比未处理样品的抗压强度增加幅度小。当炸药颗粒与黏结剂之间的法向应力大于临界法向应力时(如式 2 所示),炸药颗粒与黏结剂之间发生脱粘^[11]。

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{\sigma_{nc}}\right)^2 \geq 1. \quad (2)$$

式中: σ_n 为法向应力; σ_{nc} 为临界法向应力。

σ_{nc} 可由式(3)^[12]表示:

$$\sigma_{nc}^2 = \frac{4E_b \gamma (2 + 3V)}{3r(1 - V)}. \quad (3)$$

式中: E_b 为黏结剂的弹性模量; γ 为界面断裂表面能; V 为颗粒相的体积分数; r 为颗粒半径。

高低温老化试验后,黏结剂老化变硬,脆性增加,弹性模量也增大,由式(3)可知,炸药颗粒与黏结剂之间的临界法向应力相应增加,更不易发生脱粘,抗压强度增加。在对含铝炸药的机械感度测试结果进行研究时发现,炸药内部颗粒物质的硬度增加更容易形成热点^[13];同时在老化过程中部分铝粉会被加速氧化成为 Al_2O_3 ,莫氏硬度增加,形成了更多的热点,使机械感度增加,安全性降低。对于样品压装过程,希望抗压强度越高越好,但在试验过程中会带来机械感度的增加,从这个角度来说,力学性能的增加不利于装药过程中的安全控制。在制药工艺中通常采用添加钝感剂来降低机械感度,但对于老化后的成型药柱,继续添加钝感剂是不可能的,在药柱表面涂抹沥青漆可以有效减缓样品老化速度,使

表3 样品的抗压试验结果

Tab. 3 Results of compressive strength test

| 储存时间/d | 样品 | 抗压强度/MPa | | | | 平均抗压强度/MPa | 增加率/% |
|--------|-----|----------|--------|--------|-------|------------|-------|
| 0 | 未处理 | 5.854 | 5.649 | 5.656 | 5.617 | 5.694 | 0 |
| 14 | 未处理 | 8.983 | 9.015 | 9.158 | 9.284 | 9.110 | 59.9 |
| | 处理 | 6.870 | 6.881 | 6.264 | 6.078 | 6.523 | 14.5 |
| 28 | 未处理 | 8.260 | 10.654 | 10.162 | 9.384 | 9.615 | 68.8 |
| | 处理 | 7.336 | 5.969 | 7.173 | 6.391 | 6.717 | 17.9 |

样品保持原有性能。

3 结论

本文对含铝温压炸药(由铝粉、AP、RDX及黏结剂混合而成)进行了老化试验,老化时间分为14 d及28 d,样品分为药柱表面经处理和未经处理两种。老化后的结果为:

- 1) 药柱质量和高度均略有下降;
- 2) 样品的爆速基本保持不变(变化幅度在2%之内);

3) 未经表面处理样品的抗压强度提高60%左右,经表面处理的提高约15%,对样品进行涂漆处理,药柱保持较好的抗压力学性能;

4) 通过对样品进行表面处理,可以减缓样品的老化速度,保持样品的原有性能。

参 考 文 献

- [1] Wildegger-Gaissmaier A E. Aspects of thermobaric weaponry[J]. Military Technology, 2004, 28(6):125-126.
- [2] 韩勇,黄辉,黄毅民,等.不同直径含铝炸药的作功能力[J].火炸药学报,2008,31(6):5-7.
Han Yong, Huang Hui, Huang Yimin, et al. Power of aluminized explosives with different diameters[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(6):5-7.
- [3] 温茂萍,周红萍,徐涛,等.高温老化后HMX基PBX的压缩与拉伸性能反向变化研究[J].含能材料,2011,19(4):420-424.
Wen Maoping, Zhou Hongping, Xu Tao, et al. Reverse change of compressive and tensile properties of PBX based on HMX aged at high temperature[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4):420-424.
- [4] 刘瑞鹏,王世英,王淑萍,等.环境温度对含铝炸药装药裂纹的影响研究[J].火工品,2012(3):30-33.
Liu Ruipeng, Wang Shiying, Wang Shuping, et al. Analysis of environmental temperature on crack damage of aluminized explosive charge[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(3):30-33.
- [5] 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 Jingming, Wen Maoping, Huang Yimin. Effect of thermal cycling test on the properties of TATB based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(4):208-210.
- [6] 黄亚峰,赵省向,李文祥,等.老化对HMX/RDX基含铝炸药爆热及爆速性能的影响研究[J].火工品,2013(2):47-49.
Huang Yafeng, Zhao Shengxiang, Li Wenxiang, et al. Study on the aging effect on the explosion heat and detonation velocity of HMX/RDX based aluminized explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(2):47-49.
- [7] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A—1997 炸药试验方法[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [8] 任晓宁,常海,邵颖惠,等.改性B炸药装药的老化行为[J].火炸药学报,2013,36(4):37-41.
Ren Xiaoning, Chang Hai, Shao Yinghui, et al. Aging behavior of modified composition B explosive charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(4):37-41.
- [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,1997,20(1):15-19.
Xu Guang, Wu Chengyun, Yu Yinlin, et al. Research the adaptability of composite explosives for gradually changing temperature environment[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1997, 20(1):15-19.
- [10] 王淑萍,王晓峰,贾宪振,等.分步压装含铝炸药的成型性研究[J].兵工自动化,2013,32(9):26-27,41.
Wang Shuping, Wang Xiaofeng, Jia Xianzhen, et al. Molding property of aluminum-containing explosive for step-press-loading[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(9):26-27, 41.
- [11] Funfschilling C, Berdin C, Quidot M, et al. Micromechanical approach for modelling mechanical properties and damage of energetic materials[C]//35th International Annual Conference of ICT, 2004.
- [12] Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explo-

- sives[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 440(1909): 399-419.
- [13] 王彩玲, 陈松, 赵省向, 等. Al 粉对 RDX 机械感度的

- 影响[J]. 火工品, 2010(1): 32-34.
- Wang Cailing, Chen Song, Zhao Shengxiang, et al. Influence of Al powder on mechanical sensitivity of RDX [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(1): 32-34.

Effect of Aging on Detonation Velocity and Mechanical Property of Aluminized Thermobaric Explosive

WU Dejun^①, CHEN Yuan^①, XU Sen^{①②}, LIU Dabin^①

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To study the effects of aging test at high-low temperatures on the properties of aluminized thermobaric explosive, the research of mass-change and compressive strength were conducted, and the detonation velocity of aluminized thermobaric explosive was also measured by electric probe method before and after the aging test. The results show that the quality of the samples decreases with the increase of aging time. The detonation velocity of the samples is 6 685 m/s before aging test, and is 6 590 m/s and 6 799 m/s respectively after aging 14 days and 28 days. The detonation velocity has not changed significantly. The compressive strength of the samples is 5.694 MPa before aging test. The compressive strength of the untreated sample is 9.110 MPa and 9.615 MPa after aging 14 days and 28 days, and that of treated sample is 6.523 MPa and 6.717 MPa. The compressive strength of the treated sample is lower than that of the untreated sample. The treatment of the samples could significantly slow down the increase of the compressive strength.

[KEY WORDS] aging test; detonation velocity; compressive strength; mechanical property

(上接第 33 页)

- Lu Fangyun, Frew D J, Chen W. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 15-19.
- [10] 屈可朋, 肖玮, 韩天一, 等. RDX 基 PBX 炸药的力学行为和损伤模式[J]. 火炸药学报, 2012, 35(5): 38-44.
- Qu Kepeng, Xiao Wei, Han Tianyi, et al. Mechanical behavior and damage model of RDX-based PBX explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,

2012, 35(5): 38-44.

- [11] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4): 333-342.
- Zhou Fenghua, Wang Lili, Hu Shisheng. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4): 333-342.

Mechanical Behavior and Constitutive Model of one RDX-based PBX Explosive

QU Kepeng, SHEN Fei, XIAO Wei, WANG Shiyong

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

[ABSTRACT] Mechanical behaviors of one RDX-based PBX explosive were investigated experimentally by split Hopkinson pressure bars (SHPB) at different strain-rates (ranged from 300 to 1200 s⁻¹) respectively. The recovered specimens were analyzed by scanning electron microscope (SEM). The results show that the mechanical behaviors and the damage of the RDX-based PBX explosive are obviously rate-dependent. The constitutive model of damage-modified ZWT nonlinear visco-elastic was fitted by using the stress and strain data, which is in accord with the experiment curves well.

[KEY WORDS] energetic material; RDX-based PBX explosive; split Hopkinson pressure bars (SHPB); mechanical behavior; constitutive model