

某 RDX 基浇注 PBX 的加速老化规律与寿命评估

许春¹, 张冬梅², 张鹏¹, 郝晓飞¹, 肖茜¹, 睢贺良^{1*}

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要: 目的 掌握环三亚甲基三硝胺 (RDX) 基浇注高聚物黏结炸药 (PBX) 的加速老化规律, 分析老化机理和关键敏感参量, 并探讨加速老化寿命评估方法。方法 针对 RDX 基浇注 PBX 开展 60、70、80 °C 等恒定温度下的加速贮存老化试验, 采用微焦点 X 射线计算机断层扫描仪 (微焦点 CT)、核磁共振、气相色谱等方法, 分析浇注炸药在老化过程中微孔隙率、交联密度以及增塑剂含量等结构参量的变化规律, 通过对这几种参量的对比, 分析其老化机理, 并进一步对加速老化寿命评估方法进行初步探讨。结果 浇注 PBX 在加速老化过程中会出现明显的孔隙率逐渐增加、交联密度逐渐增加以及增塑剂逐渐降低等问题, 且表现为温度越高, 相关性能参量变化得越快。鉴于增塑剂含量的降低理论上会导致孔隙率增加, 且增塑剂具有降低感度的作用, 对于侵彻安定性具有较大的影响, 且增塑剂含量的表征方法简便, 以增塑剂含量作为浇注 PBX 的敏感参量, 采用阿伦尼乌斯模型, 对浇注 PBX 的寿命进行了评估。结论 RDX 基浇注 PBX 在加速老化过程中孔隙率、交联密度以及增塑剂含量会出现较为明显的变化, 可作为性能评价的敏感参量。以增塑剂含量作为敏感参量, 以增塑剂含量降低 10% 为判据, 推导出 RDX 基浇注 PBX 的寿命约为 14.5 a (25 °C) 和 23.8 a (21 °C)。

关键词: 浇注 PBX; 炸药; 加速老化; 老化规律; 老化机理; 寿命评估

中图分类号: TJ410.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0101-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.012

Accelerated Aging Regulation and Life Evaluation of RDX Based Cast PBX

XU Chun¹, ZHANG Dong-mei², ZHANG Peng¹, HAO Xiao-fei¹, XIAO Qian¹, SUI He-liang^{1*}

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the accelerated aging law of RDX based cast polymer bonded explosive (PBX), analyze the aging mechanism and key sensitive parameters, and explore the evaluation method of accelerated aging life. Accelerated storage aging tests were carried out at constant temperatures such as 60 °C, 70 °C, and 80 °C for RDX based cast PBX. Micro-focal CT, nuclear magnetic resonance, gas chromatography, and other methods were used to investigate the microporosity rate of cast explosive during the aging process. The variation patterns of structural parameters such as cross-linking density and plasticizer content were compared and analyzed for their aging mechanisms, and further exploration was conducted on the accelerated aging life assessment method. During the accelerated aging process of cast PBX, there would be obvious problems such as increasing porosity, increasing cross-linking density, and decreasing plasticizer. The higher the temperature, the faster the

收稿日期: 2023-08-27; 修订日期: 2023-10-07

Received: 2023-08-27; Revised: 2023-10-07

引文格式: 许春, 张冬梅, 张鹏, 等. 某 RDX 基浇注 PBX 的加速老化规律与寿命评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 101-107.

XU Chun, ZHANG Dong-mei, ZHANG Peng, et al. Accelerated Aging Regulation and Life Evaluation of RDX Based Poured PBX[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 101-107.

*通信作者 (Corresponding author)

changes in related performance parameters. Considering that a decrease in plasticizer content theoretically lead to an increase in porosity, and that plasticizers had the effect of reducing sensitivity, which had a significant impact on penetration stability. In addition, due to the characterization method of plasticizer content was sample, this article evaluated the lifespan of cast PBX using the Arrhenius model with plasticizer content as a sensitive parameter. RDX based cast PBX exhibits significant changes in porosity, cross-linking density, and plasticizer content during the accelerated aging process, which can be used as sensitive parameters for performance evaluation. In this paper, the plasticizer content is used as the sensitive parameter, and a 10% decrease in plasticizer content is used as the criterion. It is calculated that the service life of RDX based cast PBX is about 14.5 years (25 °C) and 23.8 years (21 °C).

KEY WORDS: cast PBX; explosives; accelerated aging; aging regulation; aging mechanism; lifetime prediction

浇注高聚物黏结炸药(PBX,也称为塑料黏结炸药)是一类以炸药为主体,以高分子材料为黏结剂,辅以增塑剂、钝感剂等物质而组成的复合材料^[1]。浇注PBX具有较好的成形加工特性,能量密度高,力学性能好,在高速碰撞过程中,能将一部分撞击能量消耗和储存在黏结剂中,使得这类炸药具有较强的抗过载能力^[2-4],因此浇注PBX常用于侵彻战斗部装药^[5-6]。侵彻战斗部装药在侵彻过程中一般会受到几千到几万个重力加速度的过载作用,这对装药的侵彻安定性能提出了更高的要求。然而,武器弹药在交付之后,可能出现黏结剂老化、增塑剂迁移、微孔洞增加等系列老化问题^[7-11],这些因素都可能造成炸药装药的侵彻安定性能降低,从而导致侵彻战斗部的失效。因此,对于浇注PBX的老化规律研究是炸药寿命评估中的一项必要工作。

国内目前针对浇注PBX老化规律的研究报道较少^[12-14]。王芳芳等^[15-16]报道了浇注PBX炸药老化过程中交联密度与力学性能的关系,表明浇注PBX样品体系交联密度和力学性能均随老化时间的延长而增加,且线性相关。他们研究发现,该浇注PBX炸药的降解和交联是由黏结剂母体结构变化引起的,认为黏结剂母体是引起力学性能变化的主要原因。丁黎等^[13]基于温度循环以及高温老化试验研究了环三甲基三硝胺(黑索今,RDX)基浇注PBX的老化性能,表明PBX老化过程中固化交联和降解断链作用同时存在,是引起PBX炸药力学性能变化的主要诱因。李凯丽等^[17]探讨了加速老化对RDX基PBX性能的影响,结果表明,经过高温长贮后,炸药中的黏结剂发生了氧化交联反应,使得交联度提高。可见,目前研究者们主要关注了PBX老化后力学性能的变化规律,以及分析力学性能变化的原因,针对浇注PBX的老化研究仍然不够充分,未见潜在的浇注PBX可能存在的增塑剂变化规律研究、孔隙率变化规律研究等报道,而这些性能的变化对于炸药的侵彻安定性具有较大的影响。

本文拟以典型的RDX基浇注PBX为研究对象,开展不同温度和不同老化时间下的加速老化试验,拟通过对加速老化过程中该炸药的质量、增塑剂含量、孔隙率、交联密度等老化参数的变化规律进行跟踪测试。在此基础上,分析浇注PBX的老化机理和关键

敏感参量,进一步初步对浇注PBX的安全贮存寿命进行评价,为浇注PBX加速老化试验方法的建立提供数据和技术支撑。

1 试验

1.1 材料

浇注PBX由中国工程物理研究院化工材料研究所提供,主要由HTPB、TDI、IPDI、DOS、RDX等材料组成,其中RDX的质量分数约为90%。

1.2 测试表征

1) 恒温加速老化试验。将 $\phi 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 的炸药样品,采用铝塑膜密封封装,放入油浴老化烘箱中进行加速老化。老化温度分别60、70、80 °C,在这3种温度下的最长老化时间分别为210、240、80 d。

2) 孔隙度测试。对于 $\phi 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 炸药药柱,采用的微焦点X射线计算机断层扫描仪的微焦点模式测试其孔隙度。测试参数:X射线管电压为70 kV,X射线靶功率为6.3 W,FDD与FOD的比例为2.8,探测器帧数为1.6 Hz,旋转角度为360°,采样数据为1 440张。采用面振探测器接收X射线信号,得到炸药的二维DR数据,采用VG Studio MAX3.0图像评估软件开展孔隙度分析。

3) 交联密度测试。采用核磁共振法进行交联密度测试。核磁共振的氢共振频率为21.800 MHz,磁体强度为0.52 T,线圈直径为10 mm,测试温度为60 °C。试样取自炸药药柱中心部位,尺寸为3 mm \times 3 mm \times 5 mm的小药块。

4) 增塑剂含量测试。采用气相色谱仪对炸药装药的增塑剂含量进行跟踪监测,色谱柱1m5%OV-101固定相,柱温为215 °C,FID检测器进样口温度为250 °C,检测室温度为250 °C,载气为氮气流速40 mL/min。

2 结果和讨论

2.1 老化过程中质量变化规律

针对60、70、80 °C等3个老化温度下的试验件

进行了质量变化测试, 试验结果见表 1。通过以上三温度质量损失数据可以看出, 随着老化时间的增加, 炸药装药的质量会缓慢减小, 表现为温度越高, 质量减小得越快。为了更好地对数据进行分析, 绘制了炸药质量和质量变化率随着老化时间的变化趋势, 如图 1 和图 2 所示。可以看出, 炸药重量损失的速度随着老化时间的增加而缓慢降低, 60、70 °C 经历 123 d 老化后, 质量损失百分数仅在 0.07%, 80 °C 经历 62 d

的质量损失百分数达到 0.09%, 变化率不超过 0.1%, 说明炸药装药的质量保持性较好。炸药的质量损失可能与高分子材料的裂解、低熔点物质的挥发以及炸药的热分解有关, 可能还与 PBX 的氧化吸湿等因素有关, 具体是哪种因素造成了该炸药的质量损失, 仅从质量损失的数据难以获得。如需确定炸药质量损失的原因, 还需要开展炸药释出物的成分分析工作, 目前该工作有待开展。

表 1 不同老化条件下的药柱质量
Tab.1 Sample weight under different aging conditions

60 °C			70 °C			80 °C		
时间/d	质量/g	质量变化率/%	时间/d	质量/g	质量变化率/%	时间/d	质量/g	质量变化率/%
0	39.268 5	0	0	39.302 7	0	0	39.26	0
10	39.250 3	0.046 3	19	39.28	0.057 7	4	39.245 2	0.037 7
19	39.248 1	0.051 9	27	39.278 2	0.062 3	13	39.238	0.056 1
55	39.242 9	0.065 2	55	39.273 7	0.073 8	19	39.234	0.066 3
78	39.241 7	0.068 2	62	39.272 7	0.076 3	27	39.23	0.076 5
95	39.240 3	0.071 8	95	39.268 7	0.086 5	38	39.227	0.084 1
123	39.238 8	0.075 6	123	39.267 7	0.089 1	62	39.224	0.091 7

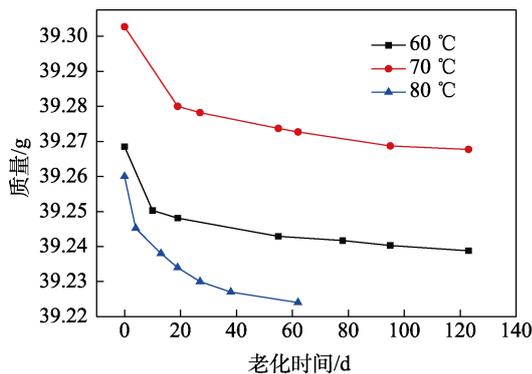


图 1 不同老化时间下的炸药质量
Fig.1 Explosive weight with aging time

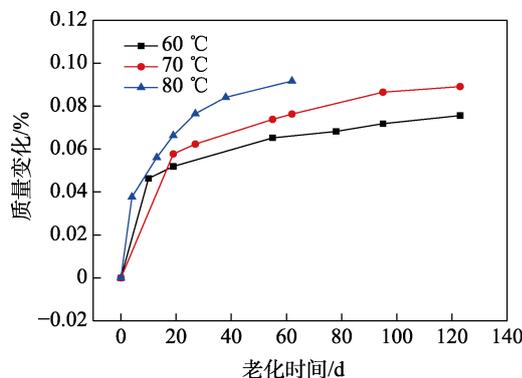


图 2 炸药质量随着老化时间的变化
Fig.2 Changes in explosive weight loss with aging time

在老化过程中, PBX 的孔隙率随着老化时间的增加而逐渐增加, 老化温度越高, 孔隙率越高。对于 HTPB/固化剂和增塑剂组成的黏结剂体系, 在老化试验的温度水平加载下, 增塑剂具有一定的热稳定性, 化学性质基本没有变化, 但挥发性大, 耐迁移性较差, 所以增塑剂在热老化过程中可能存在挥发和迁移。由于增塑剂的迁移挥发会直接导致浇注 PBX 产生相应的微孔洞等特征结构, 因此孔隙率的增加与增塑剂的挥发迁移具有必然的相关性。温度的升高有利于增塑剂的加速迁移挥发, 从而使得浇注 PBX 在较高温度下会产生较高的孔隙率。

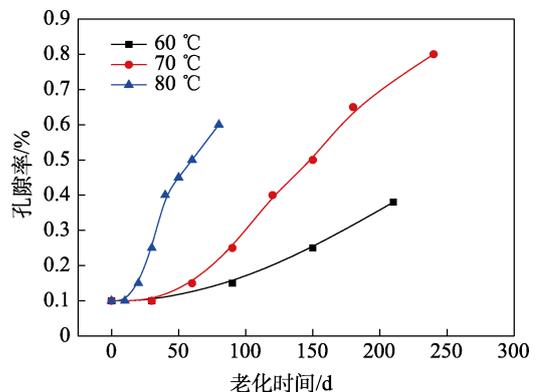


图 3 炸药孔隙率变化曲线
Fig.3 Variation curve of explosive porosity

2.2 浇注 PBX 孔隙率变化研究

根据 CT 表征结果以及数据处理软件获得炸药内部结构信息, 得到孔隙率数据, 见图 3。可以看出,

2.3 浇注 PBX 交联密度变化研究

交联密度测试方法有平衡溶胀法、应力-应变法、动态热机械分析法、流变法等, 随着分析理论和分析

仪器的进步,一些新手段已被用来测定交联密度,如核磁共振法等。本文采用核磁共振法进行交联密度测试。核磁共振法测定交联密度的主要依据是,高分子中氢原子所处交联状态不同时,其横向弛豫时间不同,该横向弛豫机制对于分子内部运动具有高敏感性,可用横向弛豫时间表征高分子链的运动,利用核磁共振交联密度模拟计算模型进行交联密度计算。根据低场核磁共振法的原理,采用该方法测试交联密度时,测试结果为聚合物体系的总交联密度。炸药装药老化过程中的交联密度测试结果见图4,可见,随着老化程度的增加,炸药药柱的交联密度呈现递增的变化趋势。在老化过程中,浇注型 PBX 交联密度的增加主要可能是由于黏结剂的后固化以及黏结剂发生的氧化交联造成的,这与魏小琴等^[18]在 HTPB 基推进剂老化研究中的结论相似。

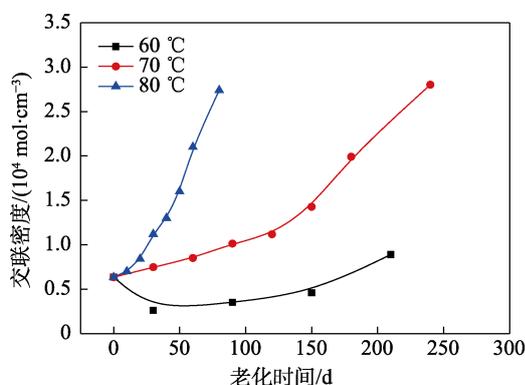


图4 炸药老化过程中交联密度变化曲线

Fig.4 Curves of cross-linking density during explosive aging

2.4 炸药装药增塑剂含量变化研究

通过气相色谱对炸药装药试样在热加速老化过程中增塑剂 DOS 的含量进行检测,观测装药试样中增塑剂 DOS 的挥发迁移程度,获得装药中增塑剂 DOS 含量的变化规律。增塑剂 DOS 含量试验数据见图5。从图5中可见,增塑剂含量呈现先快速减少后缓慢减少的趋势,且温度越高,增塑剂含量减少得越

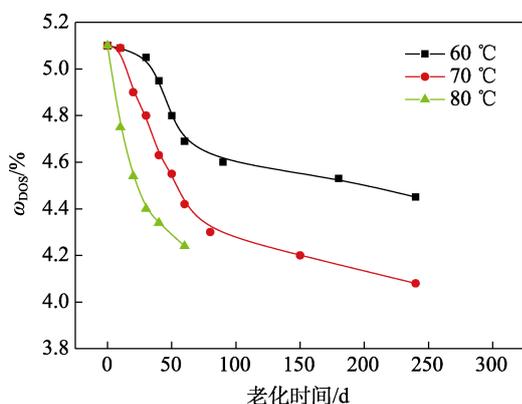


图5 炸药增塑剂含量变化曲线

Fig.5 Change curve of plasticizer content in explosives

快。在 80 °C 的条件下,经过 60 d 的老化后,增塑剂的含量会降低到原来含量的 83%,降低了近 20%,具有较为显著的变化。该数据表明,在老化过程中,浇注 PBX 的增塑剂存在明显迁移减少的现象。这也呼应了对于 HTPB/固化剂和增塑剂组成的黏结剂体系中增塑剂挥发性大,容易挥发迁移的设想。

2.5 炸药装药老化机理与寿命评估

从以上老化过程中炸药装药的物理结构、化学结构、理化性质的变化进行初步分析可知,炸药装药在老化后,宏观结构上质量变化减小,炸药装药的孔隙率从 0.10% 增加到 0.80%,交联密度从 $0.6 \times 10^4 \text{ mol/cm}^3$ 增加到 $2.1 \times 10^4 \text{ mol/cm}^3$,增塑剂从 5.10% 下降到 4.08%。由此可以得出,炸药装药经过加速老化后,装药试样的孔隙率、交联密度、增塑剂含量都有不同程度的变化,这 3 种参量的变化对炸药装药的结构变化都有贡献,即都能够从不同程度上表征炸药装药在老化过程中的结构性能变化。

浇注型 PBX 在老化过程中,交联密度的增加主要可能是由于黏结剂的后固化以及黏结剂发生的氧化交联造成的,这有利于提高装药件的结构强度,并减少孔隙率,提高装药在高速撞击过程中黏结剂对于能力的吸收作用,同时减少热点的产生,因此交联密度的增加不是炸药失效的薄弱环节。孔隙度的增加有利于产生更多的热点,对于装药的侵彻安定性具有潜在的影响,以孔隙度作为薄弱环节进行炸药的性能评估具有一定的科学性。增塑剂的挥发与微孔隙的产生具有直接关系,增塑剂一般能够降低炸药的感度^[19],增塑剂含量的降低也是浇注 PBX 潜在的薄弱环节。目前,微焦点 CT 设备昂贵,普及率不高,难以用于材料寿命评估。另外,在孔隙率解析时,可能会由于试验条件仪器状态的不同对测试结果产生影响。气相色谱法测量增塑剂含量从方法原理、重复性、准确性和稳定性方面具有明显优势,是多年来应用于增塑剂含量检测可靠的定量检测方法,所以选择增塑剂含量作为炸药装药结构的关键参量进行寿命评估是一种较好的选择。

增塑剂挥发迁移符合根据阿仑纽乌斯方程的基本原理和适用范围,阿仑纽乌斯方程在炸药、推挤剂、高分子材料的老化寿命评估中是最为常用的一种方法^[8,20-25]。因此,本文采用 Arrhenius 方程进行寿命评定^[20],见式(1)。

$$k = A_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (1)$$

式中: k 为反应速率常数; A_0 为指前因子; E_a 为化学反应的活化能。

设试样在 t_1 时间的增塑剂含量为 M_1 , t_2 时间的增塑剂含量为 M_2 ,结合 Arrhenius 与化学反应速率理论可得:

$$|M_2 - M_1| = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} dt \quad (2)$$

则:

$$|M_2 - M_1| = A_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

若设 $t = t_2 - t_1$, 则:

$$t = \frac{|M_2 - M_1|}{A_0} e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (4)$$

若设 $M_2 = M_p$, 其中 M_p 为老化终值, 则 t_2 时刻就是试样的老化寿命, 可得:

$$\ln t = \ln \frac{|M_p - M_1|}{A_0} + \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

式(5)表明, 试样寿命的对数和老化温度的倒数有着线性关系, 如图 6 所示。为了进行寿命评估, 失效判据是一个主要的因素, 失效判据的确定依然还需要开展大量的研究工作。本文拟以增塑剂含量降低 10% 为例作为实效判据开展加速方法与寿命评估工作。不同温度下的寿命终值见表 5。

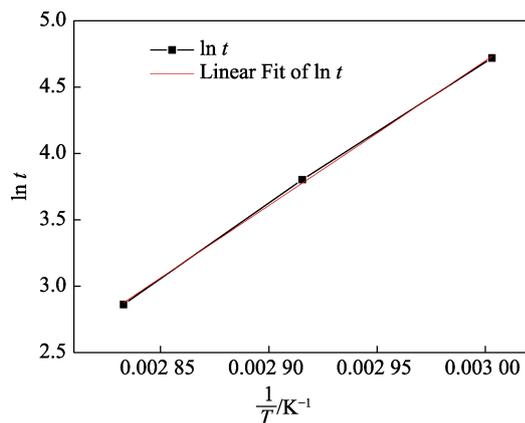


图 6 $\ln t$ 与 $1/T$ 的拟合关系

Fig.6 Fitting relationship between $\ln t$ and $1/T$

表 5 老化温度与浇注 PBX 寿命终值的对应关系
Tab.5 Aging temperature and lifetime data of cast PBX

老化温度/°F	寿命终值/d
333	112
343	44.8
353	17.5

因此, 可得到浇注 PBX 的热寿命方程为: $\ln t = 1.090 5 \times 10^4 / T - 28.0192 2$ 。基于此方程可推测出常温 (25 °C) 下, 浇注 PBX 的寿命约为 5 296 d, 约为 14.5 a; 常温 (21 °C) 下, 浇注 PBX 的寿命约为 8 713 d, 约为 23.8 a。

3 结论

1) 浇注 PBX 在加速老化过程中会出现明显的孔隙率、交联密度逐渐增加以及增塑剂逐渐降低的问

题, 且表现为温度越高, 性能参量变化得越快。

2) 交联密度的增加主要是由于黏结剂的后固化或氧化交联导致的, 孔隙率的增加主要是由于增塑剂等分子的挥发迁移导致的, 孔隙率的增加和增塑剂含量的减少具有潜在的相关性。

3) 初步通过增塑剂含量的老化试验数据, 基于阿伦尼乌斯模型, 举例以增塑剂含量降低 10% 为失效判据, 对浇注 PBX 进行了寿命评估。以 25、21 °C 作为常温条件, 浇注 PBX 的寿命分别约为 14.5、23.8 a。

虽然本文获得了老化敏感参量, 但目前尚未掌握敏感参量与炸药侵彻安定性的定量关系, 这是建立寿命评估过程中失效判据的一个重要环节, 今后是需要重点开展的研究课题。

参考文献:

[1] 宫正, 肖茜, 王林, 等. 季戊四醇丙烯醛树脂基浇注 PBX 炸药的老化性能[J]. 含能材料, 2022, 30(6): 584-590.
GONG Zheng, XIAO Qian, WANG Lin, et al. Aging Properties of Pentaerythritol Acrolein Resin-Based PBX Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(6): 584-590.

[2] 张子敏, 仲凯, 许碧英, 等. 浇注型 PBX 炸药的动态力学性能研究[J]. 火工品, 2010(6): 30-33.
ZHANG Zi-min, ZHONG Kai, XU Bi-ying, et al. Study on Dynamic Mechanic Performance of Cast PBX Explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(6): 30-33.

[3] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702-705.
LI Yuan-yuan, GAO Li-long, LI Wei, et al. Experiment Research on Security of Insensitive Explosive Charge during Penetration[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(6): 702-705.

[4] 唐桂芳, 王晓峰, 李巍. 浇注 PBX 的低易损性能研究[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 163-165.
TANG Gui-fang, WANG Xiao-feng, LI Wei. Study on Low Vulnerability of Cast PBX[J]. Energetic Materials, 2003, 11(3): 163-165.

[5] 唐明峰. 浇注 PBX 的力学行为与本构模型研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
TANG Ming-feng. Study on Mechanical Behavior and Constitutive Model of Cast PBX[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014.

[6] 高金霞, 赵卫刚, 郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. 火工品, 2008(4): 4-7.
GAO Jin-xia, ZHAO Wei-gang, ZHENG Teng. Study on the Anti-Overloading Technique for Penetrating Warhead Charge[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 4-7.

[7] 周堃, 罗天元, 张伦武. 弹药贮存寿命预测预报技术综

- 述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6-11.
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan, ZHANG Lun-wu. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(2): 6-11.
- [8] 王宝成, 牛国涛, 金大勇. 国内炸药老化及寿命评估的进展和评述[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 44-47.
WANG Bao-cheng, NIU Guo-tao, JIN Da-yong. Review and Development of Internal Explosive Aging and Life Assessment[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(6): 44-47.
- [9] 程克梅, 何芳, 夏云霞, 等. 用原子力显微镜观察 HMX 基炸药老化前后的表面形貌变化[J]. 含能材料, 2005, 13(B12): 30-35.
CHENG Ke-mei, HE Fang, XIA Yun-xia, et al. Morphology of HMX-Based Explosive with AFM before and after being Aged[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(B12): 30-35.
- [10] 杨秀兰, 睢贺良, 郝晓飞. 显微红外光谱成像技术研究 BTF 炸药老化中的组分迁移[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(S1): 55-56.
YANG Xiu-lan, SUI He-liang, HAO Xiao-fei. Drift Behavior of BTF during Aging by FTIR Microspectroscopy Imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(S1): 55-56.
- [11] 刘子如. 火炸药老化失效模式及机理[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 425-433.
LIU Zi-ru. Failure Modes and Failure Mechanisms for Aged Propellants and Explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(5): 425-433.
- [12] 王芳芳, 王琼, 于思龙, 等. 利用分离式 Hopkinson 压杆技术研究浇注 PBX 炸药的老化性能[J]. 爆破器材, 2019, 48(3): 23-28.
WANG Fang-fang, WANG Qiong, YU Si-long, et al. Application of Split Hopkinson Pressure Bar Technique in Aging Properties Study on Casting Polymer Bonded Explosives[J]. Explosive Materials, 2019, 48(3): 23-28.
- [13] 丁黎, 郑朝民, 梁忆, 等. RDX 基浇铸 PBX 的老化性能[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 156-162.
DING Li, ZHENG Chao-min, LIANG Yi, et al. Aging Properties of Casted RDX-Based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(2): 156-162.
- [14] 郭华, 祝逢春, 朱小平, 等. 某导弹战斗部装药贮存寿命评定[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 16-21.
GUO Hua, ZHU Feng-chun, ZHU Xiao-ping, et al. Evaluation of Storage Life of a Missile Warhead Charge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 16-21.
- [15] 王芳芳, 常海, 张林军, 等. 浇注 PBX 炸药老化过程中交联密度与力学性能的关系[J]. 火炸药学报, 2017, 40(2): 69-74.
WANG Fang-fang, CHANG Hai, ZHANG Lin-jun, et al. Relationship between Crosslink Density and Mechanical Properties in the Aging Process of Casting Polymer Bonded Explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(2): 69-74.
- [16] 王芳芳, 张林军, 常海, 等. 动态热机械分析法研究 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药的老化性能[J]. 火炸药学报, 2018, 41(4): 388-393.
WANG Fang-fang, ZHANG Lin-jun, CHANG Hai, et al. Study on Aging Properties of HTPB/AP-Based Casting PBX by Dynamic Thermo-Mechanical Analysis Method[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(4): 388-393.
- [17] 李凯丽, 徐同, 李席, 等. 加速老化对 RDX 基压装 PBX 炸药性能的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(5): 416-421.
LI Kai-li, XU Tong, LI Xi, et al. Effect of Accelerated Aging on the Performances of RDX-Based Pressed PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(5): 416-421.
- [18] 魏小琴, 龙仕腾, 符朝旭, 等. 环境温度对复合固体推进剂贮存老化微观损伤作用机制研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 28-31.
WEI Xiao-qin, LONG Shi-teng, FU Zhao-xu, et al. Aging Mechanism for Microscopic Damage of HTPB Propellant at Ambient Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 28-31.
- [19] 卫彦菊, 王晶禹, 安崇伟. 增塑剂类型对 CL-20/HTPB 基浇注炸药安全性能的影响[J]. 中国胶粘剂, 2015, 24(3): 10-14.
WEI Yan-ju, WANG Jing-yu, AN Chong-wei. Influences of Plasticizer Types on Safety Property of CL-20/HTPB Based Casting Explosives[J]. China Adhesives, 2015, 24(3): 10-14.
- [20] 周堃, 胡滨, 王津梅, 等. 阿伦尼乌斯公式在弹箭贮存寿命评估中的应用[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 1-4.
ZHOU Kun, HU Bin, WANG Jin-mei, et al. Application of Arrhenius Equation in Storage Life Evaluation of Ammunition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 1-4.
- [21] 徐如远, 张生鹏, 王韶光, 等. 基于性能参数退化的发动机推进剂加速退化试验建模[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 14-21.
XU Ru-yuan, ZHANG Sheng-peng, WANG Shao-guang, et al. Modeling of Accelerated Degradation Test of Engine Propellant Based on Performance Parameter Degradation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 14-21.
- [22] 张国辉, 韦兴文, 陈捷, 等. 高聚物粘结炸药老化模型比较分析[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 679-683.

- ZHANG Guo-hui, WEI Xing-wen, CHEN Jie, et al. Comparison of Aging Models of Polymer Bonded Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 679-683.
- [23] 叶朋峰, 顾晓辉, 邸忆. 基于性能参数退化的某弹用 O 型橡胶密封圈贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 123-128.
- YE Peng-feng, GU Xiao-hui, DI Yi. Storage Life Evaluation of an O-Rubber Sealing Ring for Missile Based on Performance Degradation Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(2): 123-128.
- [24] 张家宜. 高分子材料老化寿命的评定方法[J]. 特种橡胶制品, 2011, 32(3): 61-64.
- ZHANG Jia-yi. Evaluation Method of Aging Life of Polymer Materials[J]. Special Purpose Rubber Products, 2011, 32(3): 61-64.
- [25] 罗毅坚, 李建军, 艾进, 等. 基于原位红外光谱技术的键合剂贮存老化规律及寿命研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(1): 59-62.
- LUO Yi-jian, LI Jian-jun, AI Jin, et al. Study on Storage Aging Law and Lifetime of Bonding Agent Based on In-Situ Infrared Spectroscopy Technique[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2021, 19(1): 59-62.

责任编辑: 刘世忠