

文章编号: 1006-9941(2023)07-0672-07

湿热加速老化对季戊四醇丙烯醛树脂-RDX 浇注炸药力学性能的影响

宫正, 蔺楠楠, 韦承莎, 睢贺良, 孙杰

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了评估湿热老化对季戊四醇丙烯醛树脂(123树脂)-黑索今(RDX)浇注高聚物黏结炸药(PBX)炸药性能的影响,开展了湿热加速老化试验研究。采用水分吸附仪,材料试验机,扫描电镜以及红外光谱等表征方法,分析了该浇注PBX炸药试件的吸湿性能及其湿热老化前后的力学性能、断面形貌和老化机理。结果显示,RDX、123树脂及其浇注PBX的吸湿率随相对湿度的升高逐渐增加,其中123树脂的吸湿率最大,相对于主炸药RDX有较强的吸湿性,表明浇注PBX的吸湿性由体系中123树脂占主导;红外光谱结果显示123树脂经湿热老化后存在吸湿水解现象,同时湿热老化显著影响123树脂基浇注PBX力学性能,环境湿度越高123树脂基浇注PBX力学性能下降越显著,且随着老化时间延长力学性能下降明显;经65℃/90%RH老化5d抗压强度下降了17.60MPa,降幅达24.09%,抗拉强度下降了2.32MPa,降幅达28.78%,当老化30d时抗压强度下降了77.80%,抗拉强度下降了58.56%。研究结果表明123树脂基浇注PBX对湿度较敏感,而123树脂吸湿水解是导致浇注PBX力学性能显著下降的主要原因。

关键词: 季戊四醇丙烯醛树脂-RDX浇注炸药;湿热加速老化;微观结构;力学性能

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023055

0 引言

浇注高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是由炸药晶体和高聚物黏结剂组成的复合材料,采用炸药-黏结剂-固化剂体系经“捏合-真空浇注-热固化”制备工艺成型,具有抗过载能力强、安全性高等优点,经过多年发展,在侵彻弹药和超音速导弹等常规武器战斗部中广泛应用^[1-4]。季戊四醇丙烯醛树脂,又称123树脂,由季戊四醇与丙烯醛缩合的预聚物经固化而成的一种热固性树脂,力学性质、抗热性以及抗化学侵蚀性等性能较好,是一类优异的浇注黏结剂体系,已应用于火箭推进剂和高聚物黏结炸药领域^[5]。

在长期贮存以及服役过程中,受温度、湿度等环境因素的影响,123树脂浇注PBX的长期稳定性是特别

需要关注的问题。加速老化是评估材料在不同环境条件下贮存性能及使用可靠性的重要手段,通过提高应力水平(如温度,湿度和机械应力等)可加速产品老化,进而缩短自然老化试验时间,并基于性能变化规律实现产品贮存性能的快速预测^[6]。现阶段,采用加速老化的方法研究浇注PBX的贮存性能进行研究时,主要考虑温度的影响。如王芳芳等^[7]对浇注PBX炸药开展了70℃高温加速老化试验,研究了黏结剂体系的交联密度与力学性能之间的关系。丁黎等^[8]采用-55~71℃温度循环老化试验,研究了RDX基浇注PBX的老化性能。实际在长期贮存或服役使用环境下,武器弹药面临的环境条件更为恶劣,高湿环境也是需要考虑的典型环境条件,特别是浇注PBX体系,其高聚物黏结剂含量较高,具有较强的吸湿性^[9]。水分的吸附、扩散不仅会削弱黏结剂/炸药颗粒界面间的粘合力,甚至可能导致黏结剂的水解,造成界面脱粘、尺寸失稳以及力学性能显著下降,引起装药结构损伤甚至弹体破裂^[10-12]。如张晓军等^[13]采用方差分析的方法对HTPB推进剂湿热老化性能的研究发现湿度对推进剂拉伸强度的影响贡献率最大。相较于单因素热老化,考虑温度和湿度的双因素环境应力下浇注PBX老化性能的

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-05-18

网络出版日期: 2023-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助(22005282)

作者简介: 宫正(1990-),男,助理研究员,主要从事含能材料和高分子材料老化研究。e-mail: gzheng55@caep.cn

通信联系人: 孙杰(1972-),男,研究员,主要从事含能材料晶体表征与老化性能研究。e-mail: sunjie@caep.cn

引用本文: 宫正, 蔺楠楠, 韦承莎, 等. 湿热加速老化对季戊四醇丙烯醛树脂-RDX 浇注炸药力学性能的影响[J]. 含能材料, 2023, 31(7):672-678.

GONG Zheng, LIN Nan-nan, WEI Cheng-sha, et al. Effect of Accelerated Aging by Dampness and Heat on Mechanical Properties of Pentaerythritol Acrolein Resin-RDX Castable Explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(7):672-678.

研究,对贮存寿命评估更具价值,对浇注体系 PBX 炸药贮存环境条件的控制也具有指导意义。

因此,为了评估湿热老化对季戊四醇丙烯醛树脂基浇注 PBX 力学性能的影响,本研究利用水分吸附分析方法对 RDX、季戊四醇丙烯醛树脂及其浇注 PBX 的吸湿性能进行了研究,同时基于吸湿性能结果,针对季戊四醇丙烯醛树脂基浇注 PBX 炸药开展了不同湿度条件下的湿热加速老化性能研究,分析了湿热老化对季戊四醇丙烯醛树脂基浇注 PBX 炸药的影响。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

季戊四醇丙烯醛预聚物,羟值 7.0~10.5,黎明化工研究院;硫酸二乙酯(DES),分析纯,成都联合化工试剂研究所。

浇注 PBX 炸药由季戊四醇丙烯醛预聚物/固化剂(硫酸二乙酯,DES)/RDX 组成,RDX 含量约为 85%,123 树脂,由季戊四醇丙烯醛预聚物和硫酸二乙酯固化合成;将 123 树脂加工成 $\Phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 试验件,PBX 炸药加工成 $\Phi 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、 $\Phi 20\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 、 $\Phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 和 $30\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 试验件。

湿热环境试验箱(SETH-032UF,ESPEC);场发射扫描电子显微镜(Sigma HD,ZEISS);傅立叶红外光谱仪(Nicolet 800,Thermo Fisher Scientific);水分吸附仪(IGAcorp,Hiden Isochema Ltd);动态力学分析仪(DMA-Q800,TA);电子万能试验机(INSTRON5582,INSTRON)。

2.2 实验过程

2.2.1 湿热加速老化实验

65 °C 条件下的 50% RH 和 90% RH 湿热老化实验在环境试验箱开展,65 °C 条件下的 10% RH 低湿老化实验在烘箱中进行,老化过程为连续进行,设备通过程序控温,温度控制精度为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度控制精度为 $\pm 2\%$ RH。将 $\Phi 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、 $\Phi 20\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 和 $\Phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 试验件放入烘箱老化,3 发/组,分别老化 5,15 d 和 30 d 对其力学性能进行测试。

2.2.2 吸湿性能测试

吸湿性能采用水分吸附仪(IGAcorp)对样品吸湿过程中样品质量变化进行自动监控记录,得到吸湿过程曲线,试验件规格为 $\Phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 药柱,用于研究 RDX,123 树脂和浇注 PBX 药柱的吸湿性能^[14]。试验过程分为两个阶段:干燥阶段和恒温变湿阶段;干燥阶

段用于除去试验件表面的吸附水,条件为 70 °C/0% RH 干燥 10 h,干燥阶段结束后进入 65 °C 恒温变湿阶段。根据吸湿过程曲线,获取样品在干燥状态时的质量 m_0 和吸湿平衡质量 m_i ;采用公式(1)计算平衡点时样品的吸湿率。

$$\omega = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中, ω 为样品的吸湿率, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; m_0 为样品在干燥状态时的质量,mg; m_i 为某相对湿度条件下样品达到吸湿平衡的质量,mg。

2.2.3 力学性能测试

浇注 PBX 的抗压强度和抗拉强度力学性能测试采用电子万能试验机,分别按 GJB772A-97 方法 417.1 和 418.1 方法执行,3 发/组,试验温度 20 °C,加载速率为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,至药柱破坏终止试验;采用动态热机械分析仪(DMA)表征浇注 PBX 试验件($30\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$)的蠕变性能,蠕变性能的测试温度和应力分别为 30 °C 和 2 MPa,试验过程由仪器控温模块自动恒温,控温精度为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,蠕变试验时间设定为 300 min,时间结束试验停止,若在设定时间内样品被破坏,试验立即停止。

2.2.4 红外光谱和形貌分析测试

准备湿热老化前后的 123 树脂,采用 Nicolet 800 傅立叶红外光谱仪 ATR 模式获取 123 树脂的湿热老化前后的红外谱图,扫描范围 $4000\sim 800\text{ cm}^{-1}$,采用场发射扫描电子显微镜(Sigma HD,ZEISS)对湿热老化前后的 PBX 炸药断面进行了表征,加速电压为 2 kV,工作距离 15mm,SE2 模式。

3 结果与讨论

3.1 浇注 PBX 吸湿性能

本研究采用水分吸附仪获取了 123 树脂、RDX 及浇注 PBX 在 65 °C 的等温吸湿数据,3 种试验件的等温吸附曲线如图 1 所示。当环境相对湿度为 10% RH 时,123 树脂、RDX 及浇注 PBX 的吸湿率均较低。当相对湿度升高时,RDX、123 树脂和浇注 PBX 的吸湿率变化趋势均呈线性逐渐增大,其中 123 树脂在 40% RH 的吸湿率增幅(156.6%)显著大于浇注 PBX 的增幅(79.5%),而 RDX 的吸湿率增幅最小;随着环境湿度升高至 60% RH 时,123 树脂的吸湿率急剧增大,浇注 PBX 的吸湿率也呈现类似的趋势,但增幅小于 123 树脂,RDX 的吸湿率则随湿度变化较小。总体而言,在

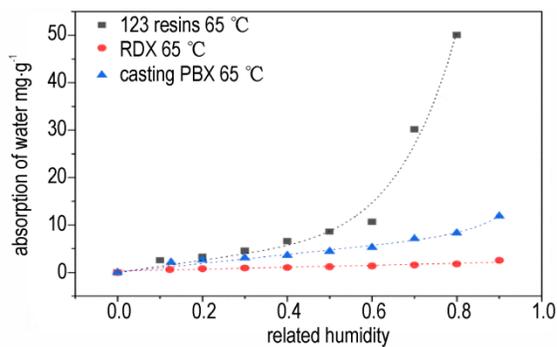


图1 123树脂及其浇注PBX的等温吸附曲线

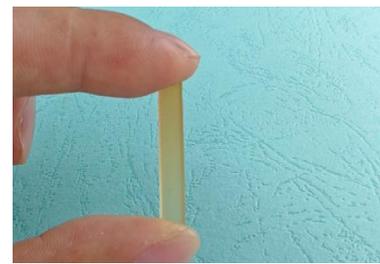
Fig.1 Isothermal adsorption curve of 123 resin and its casting PBX

室温条件相对湿度小于60% RH时,123树脂、RDX及其浇注PBX的吸湿率呈线性逐渐增加,但当在高湿环境(相对湿度大于80%)时,浇注PBX和RDX均出现了非线性吸湿现象,吸湿率明显的增加。根据Kelvin公式中弯曲表面上的蒸气压与曲率半径之间的定量关系知^[15],这主要是由于在高湿环境,试验件为水汽的凝聚提供了凝聚中心,当相对蒸汽压力达到Kelvin方程所决定的数值时,在此核心上就能发生凝聚现象。通过对比3种试验件的吸湿等温吸湿曲线,可以发现123树脂相对于主炸药RDX有较强的吸湿性。因此,123树脂基浇注PBX在湿热老化条件下的贮存性能值得重点关注。

3.2 湿热老化后123树脂的外观与红外分析

由于123树脂具有较强的吸湿性,进一步研究了湿热老化对123树脂物相结构的影响,初始样品以及经湿热(65 °C/90% RH)老化15 d和30 d的123树脂实物见图2,结果发现经湿热老化后123树脂颜色由淡琥珀色变为深褐色,材质变软且加热烘干后不可逆。

采用红外光谱仪表征了不同老化条件前后123树脂的化学结构,初始123树脂、65 °C老化15 d以及65 °C/90%RH湿热老化15 d和30 d的红外光谱图结果如图3所示。从图3a可以看到123树脂经65 °C热老化15 d,123树脂的红外吸收峰未发生明显变化,而经过65 °C/90% RH湿热老化15 d和30 d的红外光谱图在 $\sim 3330\text{ cm}^{-1}$ 和 $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$ 处出现了水的吸收谱带。图3b低频波段红外光谱图显示,除 —C—O—C—O—C— 的伸缩振动以及振动耦合峰($1144\sim 1128\text{ cm}^{-1}$),经湿热老化后的123树脂在 $1030\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 处出现了 C—OH 伸缩振动吸收峰,表明123树脂经湿热老化后部分醚键出现水解断裂。结合123树脂的吸湿性数



a. raw sample



b. aging 15 d



c. aging 30 d

图2 湿热老化前后的123树脂照片

Fig.2 Photos of 123 resins before and after moist-heat aging

据,可推论123树脂基浇注PBX对高湿环境较为敏感,经湿热老化后力学性能可能会出现劣化。

3.3 浇注PBX湿热老化后力学性能分析

为验证环境湿度对123树脂基浇注PBX力学性能的影响,选择了90% RH、50% RH和10% RH三种湿度条件,开展了65 °C不同湿度条件老化5 d的试验,研究环境湿度变化对123树脂基浇注PBX力学性能的影响,浇注PBX的抗压强度结果如图4所示。从图4可以看出,123树脂基浇注PBX经低湿环境条件热老化5 d,抗压强度略有增强,增幅为3.5%;而经中、高湿度环境条件热老化5 d,压缩力学性能显著下降,分别下降了6.9%和26.5%,其中低湿环境条件老化压缩力学性能增强是由123树脂基浇注PBX后固化现象引起^[16]。可见,环境湿度是影响123树脂基浇注PBX力学性能敏感因素,随着环境湿度的升高123树脂基浇注PBX的力学性能退化显著,为进一步分析湿热老化对123树脂基浇注PBX力学性能的影响,选择了

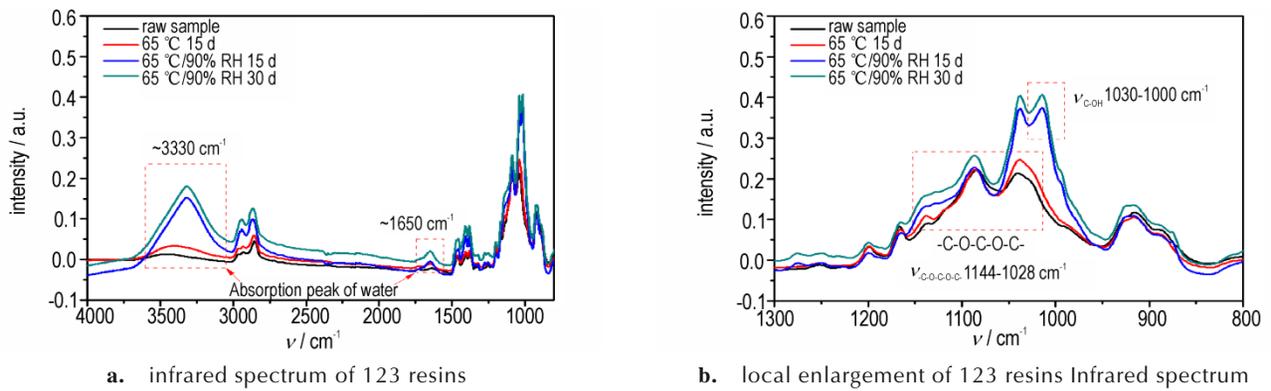


图3 不同老化条件的123树脂的红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of 123 resins under different aging conditions

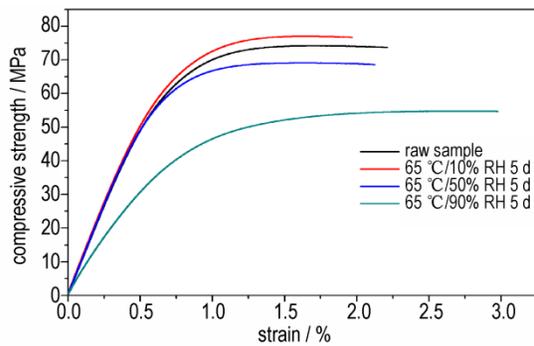


图4 123树脂基浇注PBX不同湿热老化条件后的压缩力学性能

Fig.4 Compressive mechanical properties of 123 resins based casting PBX under different moist-heat aging conditions

65 °C/90% RH 湿热环境条件,研究湿热老化的时间效应对123树脂基浇注PBX力学性能的影响。

123树脂基浇注PBX炸药经65 °C/90% RH 湿热老化前后的抗压强度和抗拉强度结果如图5所示。从图5可看出,每组试验结果重复性较好,抗压强度和抗拉强度结果显示湿热老化对浇注PBX的力学性能影响显著。抗压强度和抗拉强度对应的力学性能参量见表1,可以看到经65 °C/90% RH 老化5 d 抗压强度下降了17.60 MPa,降幅达24.09%,且随着老化时间增长,抗压强度持续下降。当老化30 d 时抗压强度从(73.07±3.78) MPa 下降至(16.22±0.65) MPa,降幅

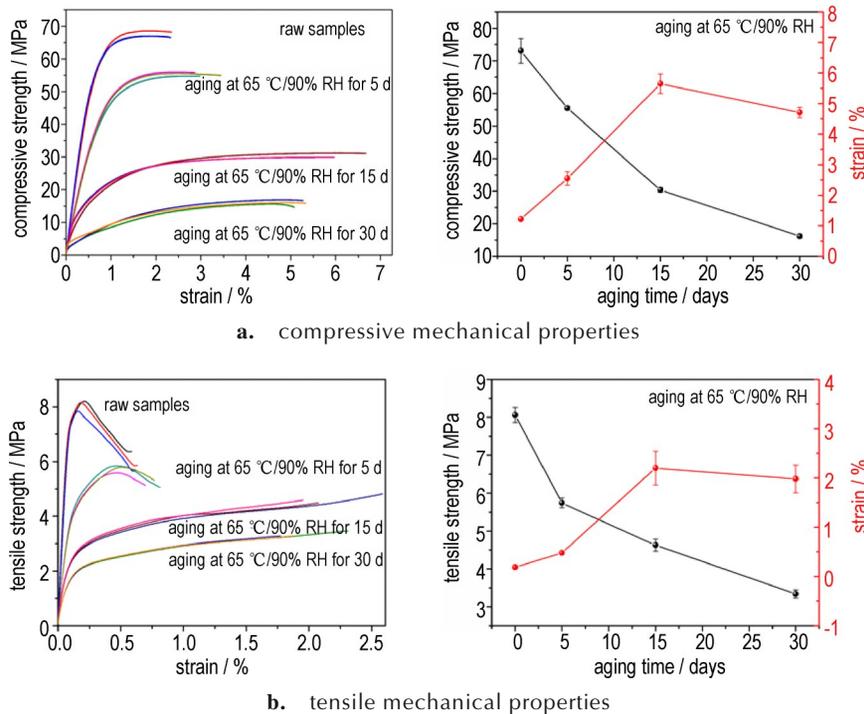


图5 123树脂基浇注PBX力学性能

Fig.5 Mechanical properties of 123 resin based casting PBX

表1 浇注PBX湿热老化前后力学性能数据(65 °C/90% RH)

Table 1 Mechanical properties of casting PBX before and after moist-heat aging (65 °C/90% RH)

test type	aging time /days	σ /MPa	ε /%	E /GPa
Compressive mechanical performance	0	73.07±3.78	1.22±0.02	10.77±0.04
	5	55.47±0.64	2.55±0.22	7.13±0.25
	15	30.37±0.76	5.65±0.32	5.56±0.72
	30	16.22±0.65	4.71±0.17	1.47±0.16
Tensile mechanical performance	0	8.06±0.20	0.19±0.03	9.14±1.05
	5	5.74±0.13	0.48±0.03	5.53±0.09
	15	4.63±0.16	2.20±0.34	4.01±0.13
	30	3.34±0.11	1.98±0.28	2.99±0.05

Note: σ , ε and E are the compressive/tensile strength, strain and elastic modulus.

达77.80%;同时,从图5a可看到压缩破坏应变随着老化时间增长而增大,当老化15d时破坏应变最大,约为(5.65±0.32)%,进一步延长老化时间,压缩破坏应变开始降低。拉伸破坏强度和应变也表现出类似的现象,如图5b所示,经65 °C/90% RH老化5 d抗拉强度下降了2.32 MPa,降幅达28.78%,当老化30 d时抗拉强度从(8.06±0.20) MPa下降至(3.34±0.11) MPa,降幅达58.56%;拉伸破坏应也是随着老化时间先增大后减小,当老化15 d时拉伸破坏强度最大;压缩和拉伸模量经湿热老化后浇注PBX的模量均持续显著下降。分析原因,123树脂浇注PBX主要由123树脂和RDX两部分组成,RDX颗粒高度填充于123树脂中,被RDX颗粒高度填充的123树脂作为PBX的骨架,其基体骨架的力学性能决定了浇注PBX的力学性能,拉伸应力-应变曲线显示经湿热老化后浇注PBX的模量下降显著,结合123树脂湿热老化后出现材质变软以及水解的现象,分析认为压缩和拉伸力学性能显著下降主要是由123树脂吸湿水解后基体变软导致。

蠕变是粘弹性材料的典型力学松弛现象,也是PBX主要的失效形式之一^[17]。采用动态热机械分析仪(DMA),分析了经湿热老化前后的123树脂基浇注PBX在30 °C/2 MPa条件的蠕变性能。图6是不同老化时间的蠕变曲线,从图中可看出老化前后浇注PBX的蠕变曲线形状基本相同,分为加载时的瞬时弹性应变和稳态蠕变两个阶段,经湿热老化后瞬时弹性应变显著增加,且随着老化时间的增加而逐渐增大;稳态蠕变结果显示初始123树脂基浇注PBX稳定性较好,稳态蠕变速率趋于0,而经湿热老化后,稳态蠕变速率增加并随老化时间的增加而逐渐增大,结果表明经湿热

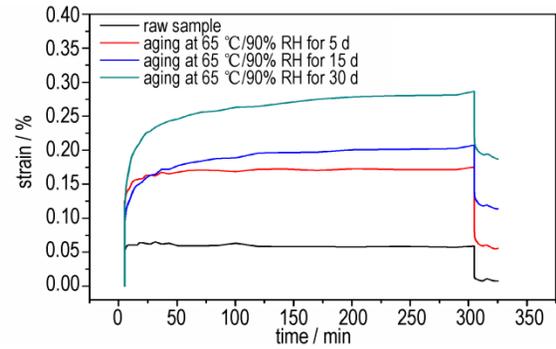


图6 123树脂基浇注PBX蠕变性能

Fig.6 Creep properties of 123 resin based casting PBX

老化后123树脂基浇注PBX的抗蠕变性能也显著下降。

3.4 浇注PBX湿热老化后形貌分析

为分析湿热老化对浇注PBX黏结剂和RDX界面性能的影响,深化认识湿热老化后浇注PBX力学性能下降的现象,对湿热老化前后的断面形貌进行了研究,采用SEM对在65 °C/90% RH老化不同时间前后的123树脂基浇注PBX试验件准静态断裂断面进行了形貌表征,结果如图7所示。从图7a可以看出,老化前的123树脂基浇注PBX试验件断面较平整,可看到图7a方框标记处较明显的RDX晶粒断面,直径约为200 μm,局部纹理具有方向性,属于脆断的特征,显示断面主要以RDX穿晶断裂为主^[18]。从图7b电镜图片可发现经湿热老化5d后试验件的断面较为粗糙,图中六边形标记处出现晶粒面比较光滑、形貌规则的晶粒,同时圆形标记处出现了大颗粒RDX被拔出后的空缺,该空缺较规整且和RDX晶形大小、形态相似,即出现了部分沿晶断裂端面(图7b),结合123树脂的水解现象以及湿热老化显著影响123树脂浇注PBX的力学性能,分析认为经湿热老化5 d后123树脂黏结剂与RDX界面结合力出现减弱;当提高湿热老化时间至15 d时,图7c的SEM结果显示断面RDX晶粒(见六边形标记)以及RDX晶粒拔出后留下的空缺(见圆形标记)进一步增多,有较明显的RDX晶粒被拔出现象,此时断面主要以RDX沿晶断裂为主;当提高湿热老化时间至30d,图7d的断面形貌同湿热老化时间15 d的断面形貌类似,主要是由于123树脂基浇注PBX经湿热老化15 d黏结剂与RDX界面结合强度已十分微弱,该结果与试验件力学性能下降情况相符,浇注PBX断面形貌进一步表明被RDX高度填充的黏结剂骨架经湿热老化后出现较明显的破坏。

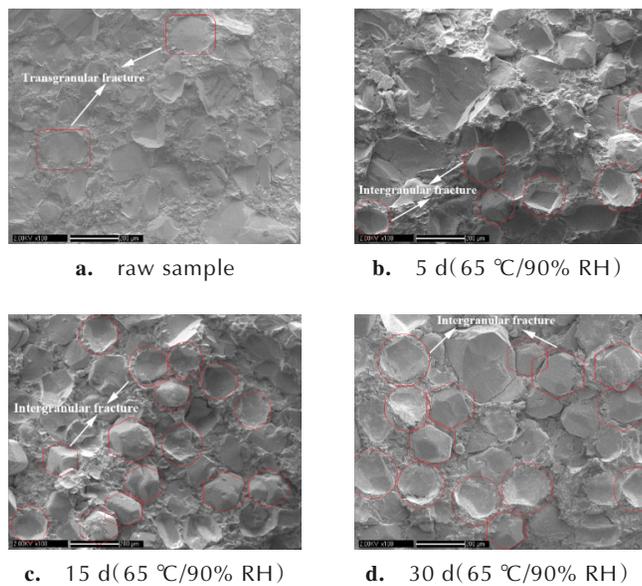


图7 不同老化时间下123树脂基浇注PBX的断面SEM图
Fig.7 Cross-sectional SEM of 123 resin based casting PBX under different aging times

4 结论

(1)分析了RDX、123树脂及其浇注PBX的吸湿性能,结果表明RDX的吸湿性较小,浇注PBX的吸湿性主要由体系中的123树脂主导;环境湿度显著影响123树脂基浇注PBX力学性能,环境湿度越高123树脂基浇注PBX力学性能下降越显著;经65 °C/90% RH老化5d压缩破坏强度下降了17.60 MPa,降幅达24.09%,拉伸破坏强度下降了2.32 MPa,降幅达28.78%。

(2)分析了湿热老化后的断面形貌,发现经湿热老化5d试验件的断面由初始的脆断特征,变为断面较为粗糙,出现了部分沿晶断裂端面,且老化试验越长沿晶断裂现象越明显,即123树脂与RDX界面结合强度下降。

(3)分析了湿热老化后123树脂基浇注PBX力学性能下降的原因,即湿热老化过程中,123树脂吸湿水解,随着水分子的扩散,浇注PBX内部黏结剂逐渐水解软化,导致力学性能显著下降。

参考文献:

[1] 唐明峰,李明,蓝林钢. 浇注PBX力学性能的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(6):812-817.
TANG Ming-feng, LI Ming, LAN Lin-gang. Review on the mechanical properties of cast PBXs[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6):812-817.

[2] 张百磊,常双君,欧亚鹏. 浇注钝感PBX的研究进展及发展趋势[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(1):42-46.
ZHANG Bai-lei, CHANG Shuang-jun, OU Ya-peng. Research progress and development trend of casting desensitized PBX [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2015, 13(1):42-46.

[3] 唐明峰,蓝林钢,李明,等. 以RDX为基的浇注PBX力学性能与本构模型[J]. 含能材料, 2014, 22(2):215-220.
TANG Ming-feng, LAN Lin-gang, LI Ming, et al. Mechanical properties and constitutive models of RDX based cast PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2):215-220.

[4] 曹仕瑾,李忠友,熊伟强,等. 低易损浇注HMX-Al基PBX炸药设计与性能[J]. 含能材料, 2021, 29(7):650-657.
CAO Shi-jin, LI Zhong-you, XIONG Wei-qiang, et al. Design and performance of a low vulnerability PBX with HMX and Al [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(7):650-657.

[5] 史远通,刘慧慧,罗观,等. 在线红外法研究季戊四醇丙烯酸酯树脂的预聚反应动力学[J]. 含能材料, 2017, 25(2):155-160.
SHI Yuan-tong, LIU Hui-hui, LUO Guan, et al. Prepolymerization reaction kinetics of acrolein-pentaerythritol resin by on-line IR technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2):155-160.

[6] BOHN M A. Prediction of equivalent time-temperature loads for accelerated ageing to simulate preset in-storage ageing and time-temperature profile loads[C]//Proceedings of the 40th International Annual Conference of ICT on 'Energetic Materials-Characterization, Modelling, Validation', 2009: 78-1 to 78-28.

[7] 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.

[8] 丁黎,郑朝民,梁忆,等. RDX基浇注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 (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2):156-162.

[9] WANG Yan-lei, MENG Zi-ping, ZHU Wan-xin, et al. Hygrothermal aging behavior and aging mechanism of carbon nanofibers epoxy composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294:1-14.

[10] DRELL S, JEANLOZ R, CORNWALL J, et al. Signatures of aging [R]. JSR-97-320:1998.

[11] BURGESS C E, WOODYARD J D, RAINWATER K A, et al. Literature review of the lifetime of DOE materials: Aging of plastic bonded explosives and the explosives and polymers contained therein [R]. Amarillo National Resource Center for Plutonium, ANRCP-1998-12:1998.

[12] EDGAR A S. Degradation mechanisms of poly(ester urethane) elastomer [R]. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-30849:2017.

[13] 张晓军,邢鹏涛,朱佳佳,等. HTPB推进剂老化性能湿热影响分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 45-50.

- ZHANG Xiao-jun, XING Peng-tao, ZHU Jia-jia, et al. Analysis of moist heat influence of aging performance of HTPB propellant [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(2): 45-50.
- [14] 王婧娜, 张皋, 严蕊, 等. 动态法研究ADN的吸湿性能[J]. 含能材料, 2012, 20(1):86-89.
- WANG Jing-na, ZHANG Gao, YAN Rui, et al. Hygroscopicity of ADN with dynamic method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1):86-89.
- [15] MALIJEVSKY A and PARRY A O. Modified Kelvin equations for capillary condensation in narrow and wide grooves[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(13):135701-1-5.
- [16] 宫正, 肖茜, 王林, 等. 季戊四醇丙烯酸树脂基浇注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. The aging performance of acrolein pentaerythritol resins-based casting PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(6):584-590.
- [17] 林聪妹, 刘世俊, 涂小珍, 等. TATB基PBX及其改性配方的蠕变性能[J]. 含能材料, 2013, 21(4):506-511.
- LIN Cong-mei, LIU Shi-jun, TU Xiao-zhen, et al. Creep properties of TATB based polymer bonded explosive and its modified formulation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4):506-511.
- [18] 唐明峰, 温茂萍, 涂小珍, 等. 高温及机械应力对PBX力学行为的影响规律及机理分析[J]. 含能材料, 2018, 26(2):150-155.
- TANG Ming-feng, WEN Mao-ping, TU Xiao-zhen, et al. Influence and mechanism of high temperature and mechanical stress on the mechanical behaviors of PBXs[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(2): 150-155.

Effect of Accelerated Aging by Dampness and Heat on Mechanical Properties of Pentaerythritol Acrolein Resin-RDX Castable Explosive

GONG Zheng, LIN Nan-nan, WEI Cheng-sha, SUI He-liang, SUN Jie

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

Abstract: In order to evaluate the effect of damp-heat aging on the properties of pentaerythritol acrolein resin (123 resin)-RDX polymer, experimental study on accelerated aging by dampness and heat was carried out. The moisture absorption properties of pouring PBX explosive specimens, mechanical properties before and after moist heat aging, section morphology and aging mechanism were analyzed by means of water adsorption instrument, material testing machine, scanning electron microscope and infrared spectrum. The results showed that the moisture absorption rate of RDX, 123 resins and pouring PBX increases with the increase of relative humidity. Among them 123 resins has the highest moisture absorption rate. Relative to the main explosive RDX has stronger hygroscopic property. The results show that the moisture absorption of pouring PBX is dominated by 123 resins in the system. The results of infrared spectrum showed that 123 resins had hygroscopic hydrolysis after heat and humidity aging. Meanwhile, moisture and heat aging significantly affected the mechanical properties of 123 resins-based casting PBX. The mechanical properties of 123 resin based cast PBX decreased significantly with the increase of ambient humidity, and the mechanical properties decreased obviously with the extension of aging time.. After aging at 65 °C/90% RH for 5 days, the compressive strength decreased by 17.60 MPa (24.09%), the tensile strength decreased by 2.32 MPa (28.78%), when aging for 30 days, the compressive strength decreased by 77.80% and the tensile strength decreased by 58.56%; The results showed that 123 resins based casting PBX was sensitive to humidity, and the hydroscopic hydrolysis of 123 resins was the main reason for the significant decrease of the mechanical properties of casting PBX.

Key words: acrolein-pentaerythritol resins-RDX casting PBX; moist-heat accelerated aging; microstructure; mechanical properties

CLC number: TJ55;O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023055

Grand support: National Nature Science Foundation of China (No. 22005282)

(责编: 高毅)