

武器装备

温度循环-应变作用下聚醚推进剂老化机理研究

赵方超^{1,2}, 魏小琴^{1,2}, 李晗^{1,2}, 尹胜杰³, 李泽华^{1,2}, 黄文明^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.中国兵器装备集团弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039; 3.上海航天动力技术研究所, 上海 313002)

摘要: 目的 掌握聚醚推进剂在温度循环与应变耦合作用下的老化机理。方法 开展 65~75 °C 温度循环和 3% 预应变耦合作用下的老化试验, 针对不同老化时间的聚醚推进剂, 分析抗拉强度、伸长率等力学性能的变化规律, 以及表面微观损伤、分子官能团、反应热等微观损伤演变情况, 综合推断聚醚推进剂宏观-微观关联老化机理。结果 随着老化时间延长, 最大抗拉强度波动下降, 最大伸长率先增大、后减小; 高氯酸铵和聚醚粘合剂的分解峰温均向低温方向移动, 位于 1410 cm⁻¹ 的高氯酸铵吸收峰增强, 而位于 1565、1725 cm⁻¹ 的聚醚粘合剂中氨基甲酸酯、酰胺基团吸收峰下降; 嵌在聚醚粘合剂内部的高氯酸铵逐渐暴露, 且部分高氯酸铵颗粒与周围界面明显分离, 并出现小孔洞。结论 在长期温度循环和预应变作用下, 聚醚推进剂分子主链中酰胺基团的 C—N 键由于分子间结合力较弱而分解断链, 破坏了分子主链网状交联结构, 使得分散其中的 AP 粒子逐渐露出表面, 并呈现部分断裂损伤特征, 引起抗拉强度下降。

关键词: 聚醚推进剂; 温度循环; 预应变; 老化机理

中图分类号: TJ04; V512 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)08-0001-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.08.001

Study on the Aging Mechanism of Polyether Propellant under Temperature Cycle and Strain

ZHAO Fang-chao^{1,2}, WEI Xiao-qin^{1,2}, LI Han^{1,2}, YIN Sheng-jie³, LI Ze-hua^{1,2}, HUANG Wen-ming^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environmental Effects, Chongqing 400039, China; 3. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT: In order to master the aging mechanism of polyether propellant under the coupling effect of temperature cycle and strain, the author of this paper carried out aging test of polyether propellant under 65 °C~75 °C temperature cycle and 3% pre-strain. For polyether propellants with different aging times, this paper analyzes the variation rule of mechanical properties, such as tensile strength, elongation, and the microscopic damage evolution, such as surface microscopic damage, molecular

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-01-14

Received: 2020-12-03; Revised: 2021-01-14

基金项目: 装备发展部维修技术研究项目 (41404040301)

Fund: Supported by the Maintenance Technical Project of Equipment Development Division (41404040301)

作者简介: 赵方超 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为装备环境适应性研究。

Biography: ZHAO Fang-chao (1987—), Male, Doctoral candidate, Research focus: equipment environmental adaptability.

通讯作者: 魏小琴 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境适应性研究。

Corresponding author: WEI Xiao-qin (1981—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: equipment environmental adaptability.

引文格式: 赵方超, 魏小琴, 李晗, 等. 温度循环-应变作用下聚醚推进剂老化机理研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 001-006.

ZHAO Fang-chao, WEI Xiao-qin, LI Han, et al. Study on the aging mechanism of polyether propellant under temperature cycling and strain[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 001-006.

functional groups and heat of reaction. At last, the macro - micro correlation aging mechanism was comprehensively inferred by the above data. With aging time prolonged, the maximum tensile strength showed declined fluctuation. The maximum elongation first increased and then decreased. Both the peak of decomposition temperature of ammonium perchlorate and polyether binder moved toward low temperature. The absorption peak of ammonium perchlorate at 1410 cm^{-1} was enhanced, while the absorption peak of carbamate at 1565 cm^{-1} and amide groups at 1725 cm^{-1} were decreased. The ammonium perchlorate embedded in the polyether binder was gradually exposed, and the separation between part of ammonium perchlorate particles and the surrounding was obvious. Meanwhile, there were small pores. Under the influence of long-term temperature cycle and pre-strain, the C—N bond of amide groups in the polyether propellant broke due to weak intermolecular binding force, and the reticular cross-linking structure of the chain was damaged, which made the dispersed AP particles gradually expose out of the surface and showed the characteristics of partial fracture damages, resulting in the decrease of tensile strength.

KEY WORDS: polyether propellant; temperature cycle; pre-strain; aging mechanism

聚醚推进剂是以环氧乙烷和四氢呋喃为单体, 采用阳离子开环聚合制备的一种端羟基共聚物, 具有黏度低、力学性能好、比冲高、不易结晶等特点, 主要用于少烟和高能推进剂, 也是目前各国仍广泛使用的重要推进剂^[1-6]。当聚醚推进剂作为浇注型固体发动机药柱时, 由于固化降温作用而处于应变状态, 影响推进剂的老化寿命^[7]。在其随弹长期贮存时, 聚醚粘合剂的化学结构具有薄弱点, 易受贮存环境温度循环作用而出现老化, 贮存性能下降, 引起固体发动机贮存失效。因此, 揭示聚醚推进剂在温度循环与预应变耦合作用下的老化机理, 可为采取合适防老化措施、合理预测贮存寿命等奠定理论基础。

目前, 国内外一般在实验室恒定温度加速老化试验的基础上, 结合各种仪器分析手段(如热分析法^[8-10]、红外光谱法^[11-13]、反相气相色谱技术^[14]、动态力学分析法^[15-16]等), 通过监测粘合剂降解、质量损失、动态力学性能等变化情况, 研究聚醚推进剂老化机理。近年来, 有学者针对其他固体推进剂开展交变温度^[17]、恒定温度-预应变作用^[18-20]老化机理研究。

文中针对聚醚推进剂开展温度循环与预应变耦合作用下的加速老化试验, 采用多种仪器分析手段表征聚醚推进剂老化前后的宏观力学性能、表面微观损伤、分子官能团含量、反应热等演变情况, 相互印证并综合推断聚醚推进剂宏观-微观关联老化机理。

1 试验

1.1 试验样品

聚醚类复合固体推进剂的主要成分为: 粘合剂端羟基环氧乙烷四氢呋喃共聚醚(PET); 氧化剂高氯酸铵; 能量添加剂铝粉, 即 PET/AP/Al。按 GJB 770B—2005《火药试验方法》B 型拉伸样尺寸要求(浇注成形), 制成聚醚固体推进剂标准试件, 即 $120\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 标距 70 mm 。

1.2 试验方法

1) 应变计算。基于三维本构模型, 应用 MSC.PATRAN、MSC.NASTRAN 和 MSC.MARC 大型商用有限元结构分析软件, 建立固体火箭发动机三维有限元模型, 并对推进剂药柱由零应力温度($68\text{ }^{\circ}\text{C}$)历时 1 d 下降至常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)的整个过程进行数值仿真, 研究装药的应力应变分布, 获得推进剂在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最大应变值。

2) 应变施加。设计推进剂拉伸试样的加载工装, 按照基准加载应变条件, 通过工装两端螺栓, 调节变形量, 控制应变加载水平, 并以数显游标卡尺作为测量工具, 保证加载的准确性。聚醚推进剂试件需施加应变载荷(模拟固体发动机固化降温至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的应变值 3%, 模拟自由装填推进剂应变 0%), 具体操作过程为: 将固体推进剂拉伸试件工程标距分别伸长至 70 mm (无应变)、 72.1 mm (3%)。

3) 试样封装。将加载好的推进剂拉伸试样放入防静电铝塑袋, 并进行封装, 封装环境条件: 温度为 $(20\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $55\%\pm 5\%$ 。

4) 试验实施, 根据 QJ 2328A—2005《复合固体推进剂高温加速老化试验方法》规定, 聚醚类推进剂的最高试验温度不超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该类型推进剂在库房实际贮存时, 日温差一般不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了保证与实际服役老化机理保持一致, 且具有一定加速性, 文中将无应变、3%应变等 2 种聚醚推进剂拉伸试样置于安全型高低温试验箱内, 开展温度循环试验, 其中最高温度 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低温度 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 单个循环时长为 24 h (日循环), 循环次数为 70 次。

1.3 性能测试

1) 采用 GJB 770B—2005《火药试验方法》, 测试推进剂试件的最大拉伸强度和最大伸长率。

2) 利用美国 TA 公司的 Q100 型 DSC 热分析仪, 以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率获得热流信号。

3) 利用美国 Nicolet 公司的 470 型傅里叶红外

光谱仪, 开展全反射红外光谱扫描, 获取化学官能团信息。

4) 利用英国 OXFORD 公司的扫描电镜、INCN 能谱仪开展断面形貌观察和成分分析。

2 结果及分析

2.1 力学性能测试结果

聚醚推进剂在 3 种应变水平下开展温度循环试验的力学性能测试结果如图 1 所示。

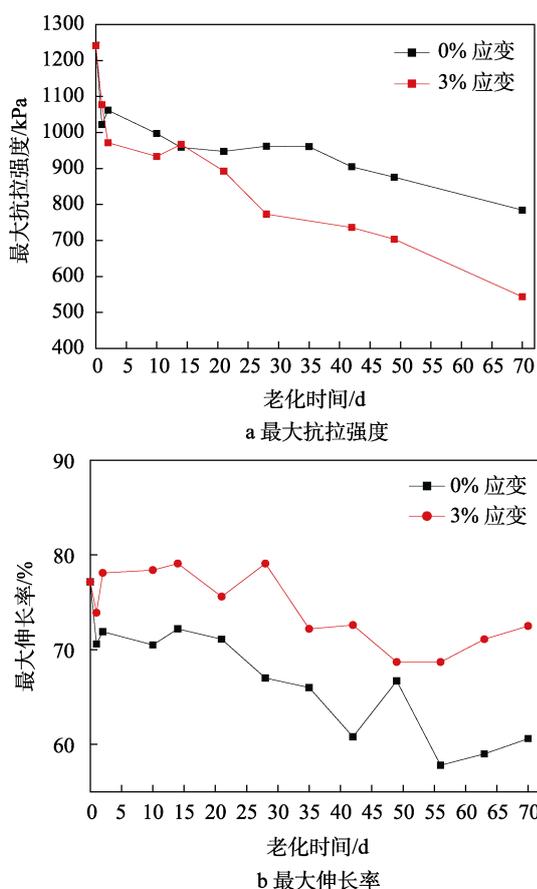


图 1 聚醚推进剂加速老化不同时间的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of different accelerated aging time of polyether propellant

从图 1 可知, 随着老化时间的增加, 聚醚推进剂的最大抗拉强度 σ_m 出现波动下降趋势, 而最大伸长率 ε_m 在老化前期增大, 但随着时间延长又开始回落, 最后略低于初始值。同一老化时间, 随着应变量的增加, 聚醚推进剂的最大抗拉强度降低, 最大伸长率增大。

固体推进剂最大抗拉强度 σ_m 的主要影响因素为分子键能、分子间相互作用力。当固体推进剂发生化学或物理交联时, 其最大抗拉强度 σ_m 会增大。最大伸长率 ε_m 的主要影响因素为高聚物断链、分子链柔顺度、高分子链侧链数量和大小、基体/填充物颗粒

界面强度等。当固体推进剂分子主链发生断裂或降解时, 推进剂分子量会降低, 范德华力减弱, 使得 ε_m 降低; 当推进剂分子侧链增加, 其分子量会增大, 范德华力随之增强, ε_m 增大。

此外, 最大抗拉强度与预应变、温度关系紧密。研究表明, 在聚醚推进剂老化初期, 预应变作用容易导致分子主链发生变形, 使其断裂活化能降低, 此时在温度的作用下, 最大抗拉强度迅速下降; 在聚醚推进剂老化后期, 应变作用会在推进剂的粘合剂与固体填料间产生较为严重的界面损伤, 温度的作用加快了界面损伤程度, 最大抗拉强度继续下降。

综上所述, 聚醚推进剂在温度循环-预应变加速老化过程中, 主要发生高分子主链分解断链, 使得主链化学交联点开始减少, σ_m 降低; 同时内部分子键能、高分子范德华力减弱, 高分子断链引起 ε_m 降低。另外, 由于预应变的作用, 分子链之间的作用力下降, 粘合剂网状结构的有效交联密度减小, 主链发生断链反应的几率增大, 致使推进剂抗拉强度下降, 最大伸长率变大。

2.2 热力学性能分析结果

聚醚推进剂在 65~75 °C、3%应变作用下老化不同时间 (0、14、42 d) 的红外光谱如图 2 所示。纯 PET 粘合剂热分解 DSC 曲线在 425 °C 附近出现放热峰, AP 氧化剂热分解 DSC 曲线有 1 个吸热峰和 2 个放热峰, 分解温度分别是 244.2、304.6、421.7 °C, 代表 AP 晶型转变、AP 低温分解、AP 高温分解。

从图 2a 可知, 聚醚推进剂原始样的 DSC 曲线包括 1 个吸热峰和 3 个放热峰, 对应的温度分别是 244.01、283.82、356.96、418.28 °C。由于聚醚推进剂主要由 PET 粘合剂、AP 氧化剂、Al 粉金属燃料组成, 其中金属 Al 粉可加快 AP 分解速率, 使其放热更集中, AP 分解峰温会向低温移动。AP 分解会放出大量热, 同样引起 PET 粘合剂分解温度降低, 即向低温移动至 418.28 °C。

从图 2b、2c 可以看出, 聚醚推进剂在老化 0、14、42 d 时, 位于 244.01、283.82 °C 处的 AP 吸热峰和低温放热峰几乎无变化, 但位于 356.96、418.28 °C 的 AP 高温放热峰、PET 粘合剂分解峰温向高温移动, 且 PET 粘合剂分解峰强度大大降低。研究表明, 推进剂组成复杂, 在老化过程中, 氧化交联会释放热量, 而弱键断裂则需吸收能量。由此认为, 聚醚推进剂在整个老化过程中, 发生分子主链的降解断链反应, 其原因在于分子主链断裂和小分子碎片挥发都需吸收能量, 使得聚醚粘合剂的分解峰温大大延后。PET 粘合剂初始分解峰温从 418.28 °C (见图 2a) 逐渐向高温方向移动至 431.61 °C (见图 2b)、434.56 °C (见图 2c)。同时吸收能量会减缓 AP 氧化剂的分解反应速率, 使 AP 的高温分解峰温延后, 从原始分解峰温

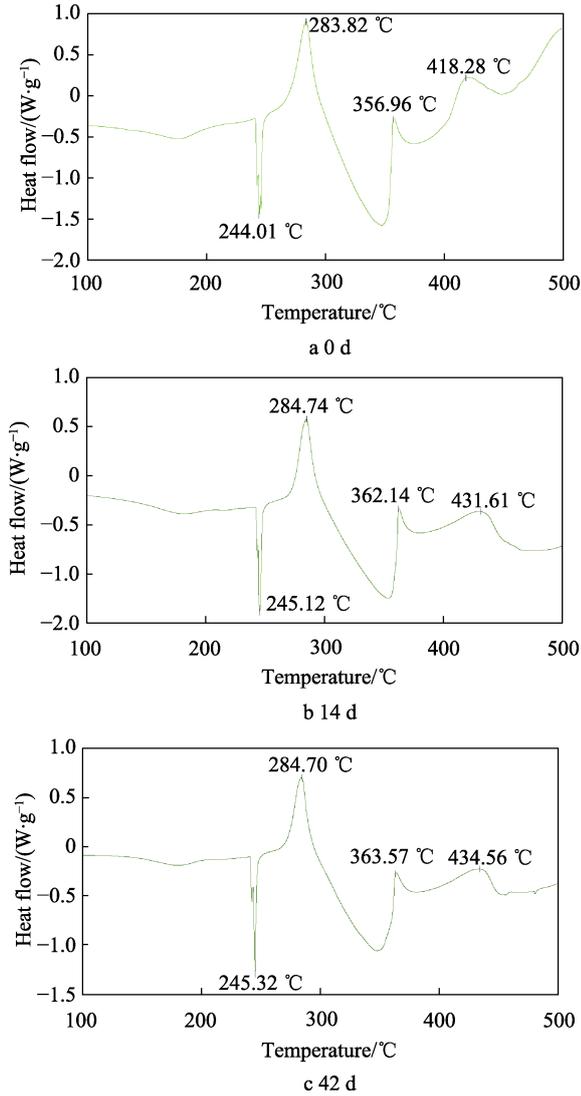


图2 聚醚推进剂加速老化不同时间的DSC谱
Fig.2 DSC spectra of different accelerated aging time of polyether propellant

356.96 °C 逐渐向高温方向移动至 362.14 °C (见图 2b)、363.57 °C (见图 2c)。与此同时, 由于 PET 粘合剂发生分子主链的降解断链反应, 主链含量降低, 分解峰强度也随之迅速降低。

2.3 红外光谱分析结果

聚醚推进剂在 65~75 °C、3%应变作用下老化不同时间(0、14、70 d)的红外光谱见图 3。

查阅红外标准谱图, 聚醚推进剂在 772 cm⁻¹ 处为碳链骨架平面摇摆振动吸收峰; 1051 cm⁻¹ 处为 C—OH 伸缩振动吸收峰; 1412 cm⁻¹ 为氧化剂 AP 吸

收峰; 1565 cm⁻¹ 为酰胺结构 $\text{R}-\text{C} \begin{matrix} \text{O} \\ \parallel \\ \text{NR}_2 \end{matrix}$ 中 C—N 弯曲振动吸收峰; 1725 cm⁻¹ 处为氨基甲酸酯结构—NHCOO 中羰基伸缩振动吸收峰; 2865 cm⁻¹ 处主要为甲基—CH₃ 和亚甲基—CH₂ 伸缩振动吸收峰; 3274 cm⁻¹ 为羟基—OH 伸缩振动吸收峰。

从图 1—3 可知, 聚醚推进剂在老化 0、14、70 d 时出现相同特征基团峰, 只是各基团含量发生改变, 即 1410 cm⁻¹ 吸收峰大大增强, 而 1565 cm⁻¹ 吸收峰大大减弱, 1725 cm⁻¹ 吸收峰略有下降。这说明在长期高温作用下, 聚醚推进剂表面的氧化剂 AP 含量逐渐增大, 聚醚推进剂主链上的氨基甲酸酯、酰胺基团含量降低。

分析聚醚推进剂网状交联结构特点, 分子主链的 C—N 键的分子间结合力较弱, 易发生分解断裂。因此, 可认为聚醚推进剂在温度长期作用下, 分子主链上酰胺基团的 C—N 键发生分解断裂, 位于 1565 cm⁻¹ 处的酰胺基团含量逐渐降低, 引起推进剂主链网状交联结构部分破坏, 使得分散在交联网状结构中的

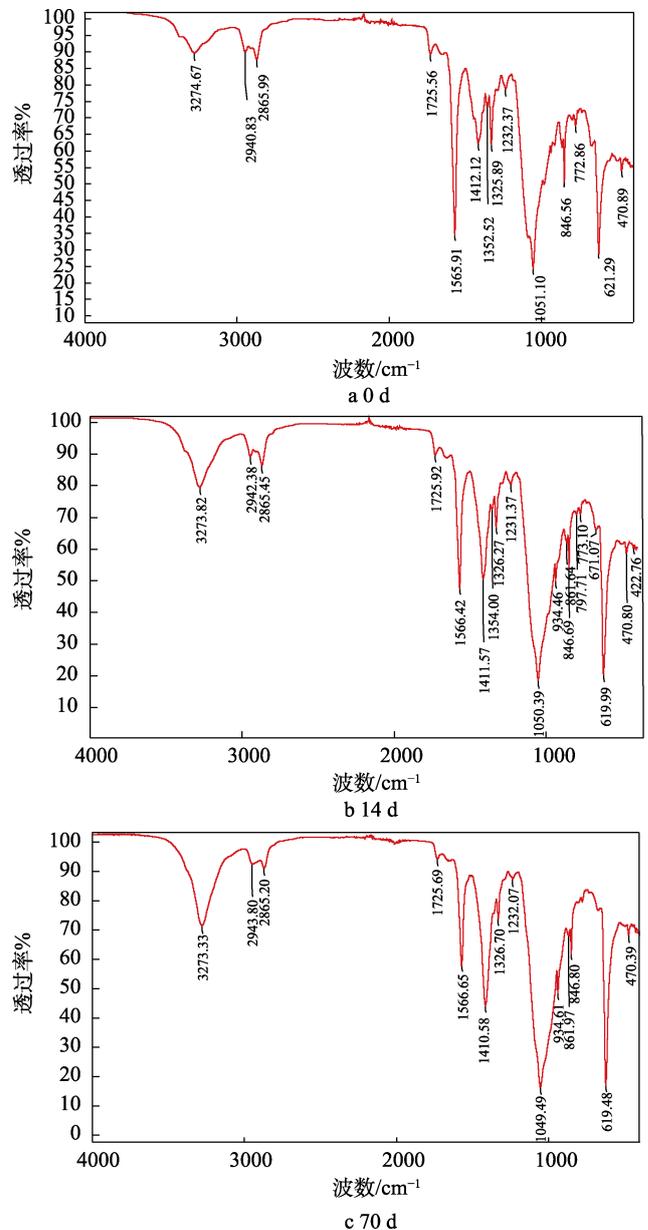


图3 聚醚推进剂加速老化不同时间的红外光谱
Fig.3 Infrared spectra of different accelerated aging time of polyether propellant

氧化剂 AP 粒子逐渐外露, 故而推进剂表面的 AP 含量增大。

2.4 表面形貌分析结果

从图 4 可以直观地看到固体推进剂各种组分的分布状态, 以及成形、断裂后的微粒是否有破碎现象。从图 4a 可知, 聚醚推进剂原始样品中的大块状组分为 AP 氧化剂, 其表面被聚醚粘合剂完全覆盖, 且有少量小颗粒金属 Al 粉也粘附在聚醚粘合剂中。对比图 4a—c 可知, 随着老化时间的延长, 覆盖在 AP 粒子表面的聚醚粘合剂发生断链反应, 网状交联结构被逐步破坏。嵌在网状粘合剂内部的大块 AP 粒子越来越多地暴露在空气中, 部分 AP 颗粒与周围界面明显分离, 且部分 AP 粒子开始出现小孔洞, 说明 AP 氧化剂也开始发生断裂。综上所述, 在温度循环和应变耦合作用下, 微裂纹更易从 AP 内部及 AP 粒子与粘合剂界面处产生, 从而观测到 AP 颗粒的断面损伤特征和粘合剂基体的断链特征。

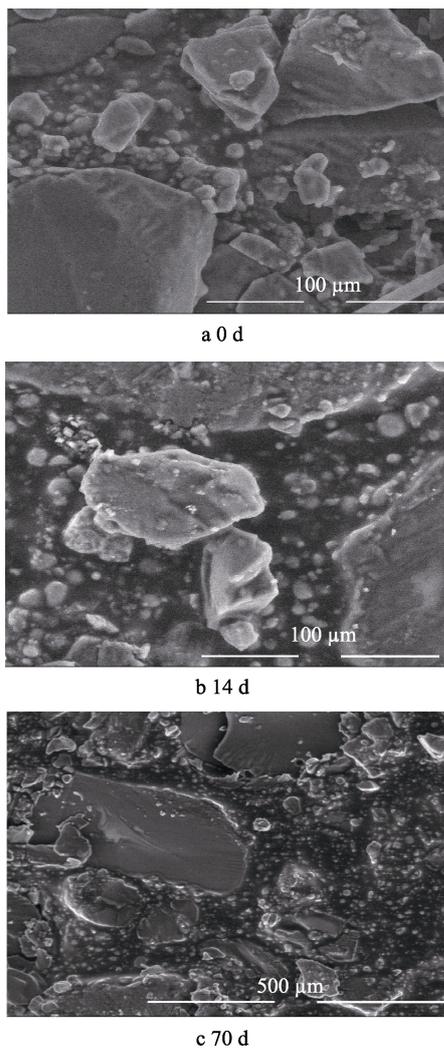


图 4 聚醚推进剂加速老化不同时间的表面形貌

Fig.4 Surface appearance of different accelerated aging time of polyether propellant

2.5 宏观-微观关联损伤机理分析

从聚醚推进剂 FTIR 谱图可知, 在温度循环和预应变的耦合作用下, 推进剂表面氧化剂 AP 含量逐渐增大, 聚醚推进剂主链上的氨基甲酸酯、酰胺含量降低。这说明试验过程中聚醚推进剂分子主链上酰胺基

团 $\text{R}-\text{C} \begin{matrix} \text{O} \\ \parallel \\ \text{NR}_2 \end{matrix}$ 的 C—N 键发生分解断裂, 引起推进剂主链网状交联结构部分破坏, 使得分散在交联网状结构中的氧化剂 AP 粒子逐渐外露。这一现象可从扫描电镜图像得到证实。在温度和应变的耦合作用下, 在 AP 粒子内部、AP 粒子与粘合剂界面处产生微裂纹, 使得推进剂呈现出 AP 粒子断面损伤和 PET 粘合剂基体断链特征。与此同时, DSC 谱图中各组分分解峰温也证实了聚醚推进剂主要发生分解断链反应。从 DSC 谱图看, 分子主链发生断裂反应需要吸收能量, PET 粘合剂分解峰温会增大, 吸收能量又会减缓 AP 氧化剂的分解反应速率, 因此 AP 氧化剂分解峰温也出现增大现象。最后, 从宏观力学性能变化趋势看, 最大抗拉强度 σ_m 波动下降, 而最大伸长率 ε_m 老化前期略有增大, 随后开始回落直至略低于初始值。这说明分子主链发生分解断链, 使得主链化学交联点减少, σ_m 降低。

3 结论

1) 聚醚推进剂在温度循环-预应变耦合作用下, 主要损伤模式是最大抗拉强度下降。其老化机理可以概括为: 推进剂中分子主链的 C—N 键分子间结合力较弱, 易发生分解断链反应, 引起推进剂主链网状交联破坏, 使得分散在交联网状结构中的 AP 氧化剂逐渐露出表面, 且 AP 氧化剂也开始发生断裂, 进而引起宏观力学性能变化。

2) 在同一老化时间, 样品施加预应变, 分子主链作用力下降, 粘合剂网状结构的有效交联密度变小, 主链发生断链反应的几率增大。宏观上表现为聚醚推进剂抗拉强度降低, 最大伸长率增大。

参考文献:

- [1] 周集义, 谭惠民. 环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚在 NEPE 推进剂中的应用进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2001(3): 1-3.
ZHOU Ji-yi, TAN Hui-min. Application progress of ethylene oxide/tetrahydrofuran copolyether in NEPE propellant[J]. Chemical propellants & polymeric materials, 2001(3): 1-3.
- [2] 苏明, 谭惠民, 王晓青. 黏合剂对 NEPE 推进剂力学性能的影响研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007, 5(5): 32-35.
SU Ming, TAN Hui-min, WANG Xiao-qing. Research progress in effect of binders on mechanical properties of

- NEPE propellants[J]. *Chemical propellants & polymeric materials*, 2007, 5(5): 32-35.
- [3] GUPTA S, DIXIT M, SHARMA K, et al. Mechanical study of metallized polyethylene terephthalate (PET) films[J]. *Surface and coatings technology*, 2009, 204(5): 661-666.
- [4] 周志勇, 范晓东, 俞国星, 等. 窄分子量分布端羟基环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚的合成及表征[J]. *中国胶粘剂*, 2007, 16(7): 6-9.
ZHOU Zhi-yong, FAN Xiao-dong, YU Guo-xing, et al. Synthesis and characterization of hydroxy terminated TEO copolyether with narrow molecular weight distribution[J]. *China adhesives*, 2007, 16(7): 6-9.
- [5] 占明明, 鲁国林, 杨玲, 等. PET/IPDI 粘合剂体系的固化催化剂研究[J]. *固体火箭技术*, 2014, 37(1): 81-85.
ZHAN Ming-ming, LU Guo-lin, YANG Ling, et al. Research on the curing catalyzer of PET / IPDI binder system[J]. *Journal of solid rocket technology*, 2014, 37(1): 81-85.
- [6] 刘国涛, 范晓东, 程广文, 等. 环氧乙烷/四氢呋喃共聚醚的合成与表征[J]. *中国胶粘剂*, 2008, 17(9): 5-9.
LIU Guo-tao, FAN Xiao-dong, CHENG Guang-wen, et al. Synthesis and characterization of ethylene oxide/tetrahydrofuran copolyether[J]. *China adhesives*, 2008, 17(9): 5-9.
- [7] 张昊, 庞爱民, 彭松. 方坯药预测寿命与发动机推进剂药柱实际寿命差异研究[J]. *固体火箭技术*, 2005, 28(1): 53-56.
ZHANG Hao, PANG Ai-min, PENG Song. Investigation on the differences between predicted lifetime of propellant carton and actual lifetime of motor propellant grain[J]. *Journal of solid rocket technology*, 2005, 28(1): 53-56.
- [8] 徐胜良, 罗岚, 胡伟, 等. PET 黏合剂及其弹性体热解与推进剂热解相关性研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2011, 9(5): 49-54.
XU Sheng-liang, LUO Lan, HU Wei, et al. Correlation investigation on thermal decomposition of PET binder, its elastomer and propellants[J]. *Chemical propellants & polymeric materials*, 2011, 9(5): 49-54.
- [9] 张腊莹, 衡淑云, 刘子如, 等. 热分析研究 PET 与某些高能氧化剂的相互作用[J]. *固体火箭技术*, 2010, 33(2): 191-195.
ZHANG La-ying, HENG Shu-yun, LIU Zi-ru, et al. Interaction of PET with some high energy oxidizers by thermal analysis[J]. *Journal of solid rocket technology*, 2010, 33(2): 191-195.
- [10] 唐岩辉, 董可海, 于向财, 等. NEPE 推进剂失重和热稳定性研究[J]. *装备制造技术*, 2018(1): 184-186, 194.
TANG Yan-hui, DONG Ke-hai, YU Xiang-cai, et al. NEPE propellant weightlessness and thermal stability study[J]. *Equipment manufacturing technology*, 2018(1): 184-186, 194.
- [11] 刘发龙, 胡伟, 程福银, 等. 近红外光谱法测定端羟基环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚的羟值[J]. *理化检验-化学分册*, 2012, 48(6): 634-637, 642.
LIU Fa-long, HU Wei, CHENG Fu-yin, et al. NIRS determination of hydroxyl value of PET[J]. *Physical testing and chemical analysis (part B: Chemical analysis)*, 2012, 48(6): 634-637, 642.
- [12] 吴彬, 柴春鹏, 夏敏, 等. 超支化聚氨酯对以 PET 为基聚氨酯胶片性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2009, 32(6): 11-14, 19.
WU Bin, CHAI Chun-peng, XIA Min, et al. Effect of hyperbranched polyurethane on the properties of PET-based polyurethane films[J]. *Chinese journal of explosives & propellants*, 2009, 32(6): 11-14, 19.
- [13] 程子兵. FITR 在固体推进剂老化性能检测中的应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
CHENG Zi-bing. Applied study of solid propellants aging performance detection by FTIR[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [14] 徐胜良, 胡伟, 章园园, 等. 反相气相色谱法研究 PET 聚醚黏合剂的表面性质[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2014, 12(4): 86-89.
XU Sheng-liang, HU Wei, ZHANG Yuan-yuan, et al. Study on surface properties of PET polyether binder by inverse gas chromatography[J]. *Chemical propellants & polymeric materials*, 2014, 12(4): 86-89.
- [15] 侯竹林, 韩盘铭. NEPE 固体推进剂动态力学性能的研究[J]. *固体火箭技术*, 1999, 22(2): 37-39.
HOU Zhu-lin, HAN Pan-ming. Study on the dynamic mechanical properties of NEPE propellant[J]. *Journal of solid rocket technology*, 1999, 22(2): 37-39.
- [16] 毛科铸, 马松, 罗运军. TDI 对 PET/N-100 粘合剂胶片力学性能和交联网络结构完整性的影响[J]. *固体火箭技术*, 2016, 39(3): 378-382.
MAO Ke-zhu, MA Song, LUO Yun-jun. Effect of TDI on the mechanical property and crosslinking network structure integrity of PET/TDI/N-100 binder system[J]. *Journal of solid rocket technology*, 2016, 39(3): 378-382.
- [17] 王玉峰, 黄卫东, 李金飞, 等. 复合固体推进剂交变温度载荷下的老化动力学[J]. *弹箭与制导学报*, 2016, 36(2): 78-82.
WANG Yu-feng, HUANG Wei-dong, LI Jin-fei, et al. Aging kinetics of composite solid propellant under cycling temperature loading[J]. *Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance*, 2016, 36(2): 78-82.
- [18] 程吉明, 李进贤, 侯晓, 等. HTPB 推进剂热力学耦合老化力学性能研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(10): 1984-1990.
CHENG Ji-ming, LI Jin-xian, HOU Xiao, et al. Aging mechanical properties of HTPB propellant under thermal-mechanical coupled condition[J]. *Journal of propulsion technology*, 2016, 37(10): 1984-1990.
- [19] 董可海, 孔令泽, 裴立冠, 等. 定应变下 NEPE 推进剂化学老化性能研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(2): 447-454.
DONG Ke-hai, KONG Ling-ze, PEI Li-guan, et al. Study on chemical aging properties of NEPE propellant under constant strain[J]. *Journal of propulsion technology*, 2020, 41(2): 447-454.
- [20] 张兴高, 张炜, 王春华, 等. 定应变作用下 NEPE 推进剂老化特性及寿命预估研究[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(3): 20-24.
ZHANG Xing-gao, ZHANG Wei, WANG Chun-hua, et al. The aging property and life prediction of NEPE propellant under constant strain[J]. *Journal of national university of defense technology*, 2009, 31(3): 20-24.