

# 端羟基聚丁二烯 (HTPB) 高温加速老化 机理及构效关系研究

赵志星<sup>1</sup>, 霍亮<sup>2</sup>, 陈家兴<sup>2</sup>, 武锐<sup>2</sup>, 王祺<sup>2</sup>, 石森<sup>2</sup>,  
李亚军<sup>2</sup>, 曾繁琦<sup>3</sup>, 吕亚栋<sup>3\*</sup>

(1. 海军装备部驻西安地区军事代表局, 西安 710000; 2. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010;  
3. 四川大学 高分子科学与工程学院, 成都 610065)

**摘要:** **目的** 揭示端羟基聚丁二烯 (HTPB) 推进剂材料的高温加速老化机理, 获得其在微观结构与宏观性能变化之间的关联。**方法** 系统研究典型 HTPB 推进剂材料高温老化下的微观结构变化与宏观性能变化, 重点探究其在高温加速老化下的分子机理及失效规律研究, 并通过建立微观结构与宏观性能的对应关系来推断其性能变化。**结果** HTPB 推进剂材料宏观性能随老化时间增加而变化主要是因为其微观结构损伤 (基体氧化交联、界面损伤等) 造成的, 同时其氧化交联反应不仅发生在样品表面, 在样品内部也观察到类似反应。进一步研究发现, 其力学性能 (拉伸强度、断裂应变) 与玻璃化转变温度 ( $T_g$ )、 $\alpha$  松弛峰以及凝胶含量有较强相关性。**结论** 高温加速老化过程中, HTPB 推进剂材料内部和表面均会发生氧化, 同时出现填料-基体界面损伤, 这些微观结构损伤主要造成了其力学性能衰减。

**关键词:** 推进剂材料; 老化机理; 宏观性能; 微观结构; 构效关系; 加速老化评价方法

**中图分类号:** V512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)12-0051-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.007

## Accelerated Aging Mechanism and Correlation of Hydroxyl-terminated Polybutadiene (HTPB)

ZHAO Zhixing<sup>1</sup>, HUO Liang<sup>2</sup>, CHEN Jiaying<sup>2</sup>, WU Rui<sup>2</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, SHI Sen<sup>2</sup>,  
LI Yajun<sup>2</sup>, ZENG Fanqi<sup>3</sup>, LYU Yadong<sup>3\*</sup>

(1. Military Representative Bureau of Naval Equipment Department in Xi'an, Xi'an 710000, China; 2. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute, Hohhot 010010, China; 3. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**ABSTRACT:** The work aims to elucidate the high-temperature accelerated aging research and mechanistic analysis of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (HTPB) propellant materials, and establish a linkage between microstructural alterations and macroscopic property variations. It systematically examined the microstructural transformations and macroscopic property variations in typical HTPB propellant materials subject to high-temperature aging. The emphasis was placed on investigating the

收稿日期: 2024-03-25; 修订日期: 2024-09-24

Received: 2024-03-25; Revised: 2024-09-24

引文格式: 赵志星, 霍亮, 陈家兴, 等. 端羟基聚丁二烯 (HTPB) 高温加速老化机理及构效关系研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 51-57.  
ZHAO Zhixing, HUO Liang, CHEN Jiaying, et al. Accelerated Aging Mechanism and Correlation of Hydroxyl-terminated Polybutadiene (HTPB) [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 51-57.

\*通信作者 (Corresponding author)

molecular mechanisms and failure modes during accelerated aging, and deducing performance variations through the establishment of a correlation between microstructure and macroscopic properties. The findings suggested that the primary cause of macroscopic property variation over time was mainly attributed to microstructural damages, such as oxidation and cross-linking of the matrix as well as the interface damage, with oxidation cross-linking reactions observed not merely on the specimen's surface but also internally. Further investigation revealed a significant correlation between mechanical properties—tensile strength, elongation at break—and glass transition temperature ( $T_g$ ), the  $\alpha$ -relaxation peak, and gel content. Oxidative damage in both the internal and surface regions of HTPB propellant materials, accompanied by filler-matrix interface damage during the high-temperature accelerated aging process, fundamentally results in the decline of mechanical properties.

**KEY WORDS:** propellant materials; aging mechanisms; macroscopic property; microstructure; structure-function relationship; accelerated aging evaluation method

端羟基聚丁二烯 (HTPB) 固体推进剂大量应用于国防装备发动机等, 具有很高的能量, 燃烧时会产生高温的气体产物, 主要由氧化剂、黏合剂、固化剂、稳定剂和交联剂等多种化学成分组成<sup>[1-5]</sup>。目前关于 HTPB 推进剂的高温加速老化研究有很多<sup>[6]</sup>, Duan 等<sup>[7]</sup>采用机电阻抗法研究了 HTPB 推进剂药柱的老化状态, 并且推导了黏弹性材料的复模量与机械阻抗之间的关系, 得出机电阻抗峰值随推进剂模量的增大而增大。Gonçalves 等<sup>[8]</sup>通过 DSC 对具有 11 a 保质期的火箭发动机在 3 个加热比 (5、10、15 °C) 下进行了热分析, 并使用 Arrhenius 方程获得其活化能, 通过与文献比较, 得出推进剂尚未显著老化。以上研究大多对其老化机理的分析还不够完善, 且对微观结构变化与宏观性能变化的关联研究较少。因此, 本文以典型端羟基固体推进剂 (HTPB) 作为研究对象, 重点开展端羟基固体推进剂在短期高温加速老化下的分子机理及失效规律研究, 建立起合理的微观与宏观的对应关系, 突破针对微细观结构损伤的表征方法研究及关键表征参数确定技术, 完成了不同老化条件对关键表征参数随时间变化规律的影响机制的探究, 为固体推进剂的寿命评估和科学维护提供理论指导。

## 1 试验

### 1.1 材料选择与老化

选取自然贮存时间为 20、26 a 的 HTPB 推进剂方坯, 自然贮存时避光, 并且温度保持在 20 °C 左右。针对 HTPB 推进剂新品, 在烘箱中开展高温加速老化试验, 样品置于密封铝塑袋中, 对应的加速老化温度为 70 °C, 加速老化时间分别为 0、18、73 d。

### 1.2 材料表征技术

力学性能测试: 将试样对称地夹在夹具上, 并且试样的长轴与施加的方向一致。保证作用力均匀竖直, 以 100 mm/min 测试速率进行试验。记录试样剪切破坏的最大负荷, 以此作为破坏载荷。试验结果以拉伸剪切强度以及断裂伸长率算术平均值表示<sup>[9]</sup>。测

试程序遵循 ASTM D 1002。

动态黏弹谱法测试 (DMA): DMA 试样尺寸为 35 mm×12 mm×3 mm, 选择升温范围为-100~60 °C, 升温速率为 3 °C/min, 频率选用 1、5、10 Hz。测定玻璃化转变温度,  $\alpha$  松弛峰反映老化对体系松弛转变特性的影响。

平衡溶胀法: 小心切割样品尺寸至 5 mm×5 mm×5 mm, 在甲苯溶液中浸泡溶胀 1 周, 得到初始质量、溶胀平衡质量、干燥质量分别为  $M_0$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ , 计算其凝胶含量。

激光共聚焦 (LSCM) 表征: 小心裁剪试样尺寸为 5 mm×5 mm×3 mm, 使用 20×/50×物镜以特定激光波长在反射模式下成像, 表征表面形貌的变化规律。

傅里叶红外光谱 (FT-IR): 测试波数范围为 4000~650  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数为 32 次。分别对样品表面和内部进行测试, 测试至少进行 3 次, 以保证其可重复性。

X-射线光电子能谱 (XPS): 激发源采用 Al K $\alpha$  射线, 束斑直径为 400  $\mu\text{m}$ , 工作电压为 12 kV, 灯丝电流为 6 mA。

## 2 结果及分析

不同室内加速老化时间下的丁羟基固体推进剂的应力-应变曲线如图 1a 所示。随着样品老化时间的延长, 可以发现, 高温加速老化后, 样品的曲线向高应力处抬升, 断裂应变逐渐降低。对不同老化时间下样品拉伸强度的定量统计如图 1b 所示。原始样品的断裂强度最小, 为 0.58 MPa, 随着高温加速老化时间的延长, 样品的断裂强度逐渐上升, 在高温老化 73 d 后上升至 0.72 MPa, 相比于原始样品, 增加了约 24%, 这可能是高温致使分子结构发生改变, 使得拉伸强度上升。不同老化时间下样品断裂伸长率的定量统计如图 1c 所示。从图 1c 中可知, 未老化样品的断裂伸长率最高, 接近 70%, 而随着老化时间的增加, 断裂伸长率呈现下降的趋势, 老化 18、73 d 的样品的断裂伸长率相差不大, 分别是 49%和 47%。断裂伸长率的

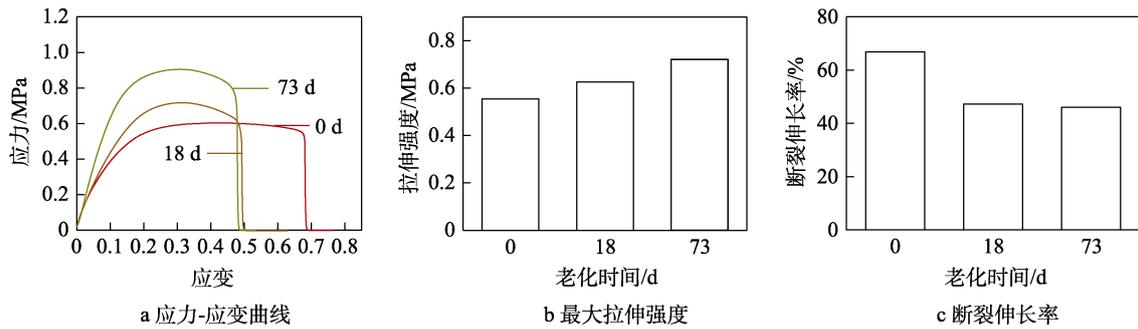


图 1 不同加速老化时间下的固体推进剂的力学性能

Fig.1 Mechanical property of solid propellant under different accelerated aging days: a) stress-strain curve; b) tensile strength; c) elongation at break

变化与拉伸强度的变化规律相反,其根本原因值得进一步探究<sup>[9-12]</sup>。

原始样品在 3 种频率 (1、5、10 Hz) 下的动态黏弹谱法 (DMA) 测试曲线如图 2a 所示。可以看出,频率的影响较小。随温度的升高,推进剂样品的分子运动具有不同的状态。当 HTPB 推进剂所处的温度远低于其玻璃化转变温度  $t_g$  时,呈现玻璃态,其表现为推进剂的储能模量  $E'$  很高,形变很小。这是因为产生的形变主要来源于黏合剂中高分子链的键长、键角变化。随着温度升高,推进剂受外力作用发生较大的形变,表现为储能模量  $E'$  迅速下降,损耗模量  $E''$  和损耗角正切呈峰形。那之后,曲线变得平缓,并基本上保持在一个平台,这时推进剂表现出高弹态。在该阶段,  $\tan\delta$  曲线出现了  $\alpha$  峰,  $\alpha$  松弛转变峰的物理本质是填料与高分子网络缠结引起的,可以反映填料与聚合物界面的相互作用<sup>[13-15]</sup>。

不同高温老化时间下样品的  $t_g$  变化如图 2b 所示,随着老化时间的延长,  $t_g$  呈现上升趋势,这与拉伸强度的变化相一致,即从分子链运动上进一步验证了交

联程度的增加,分子运动的能力下降,因此需要更大的能量才能使其发生运动。从原始样品到 70 °C 下高温老化 73 d,其  $t_g$  上升了约 2.5 °C,整体变化率不是很明显,但这仍然引起了较大的力学性能变化(如图 1 所示)。不同老化时间后,HTPB 样品的  $\tan\delta$  曲线  $\alpha$  松弛峰值的变化如图 2c 所示。由图 2c 可知,高温加速老化样品随老化时间的增加, $\alpha$  松弛峰逐渐下降。根据之前的研究表明<sup>[16]</sup>,这是由于推进剂老化过程中因氧化交联使推进剂网络结构生成新的交联点,即上述力学性能和玻璃化转变温度变化反映的交联程度的增加。在上述过程发生时,被解冻“高分子更大的链段”运动,由于老化生成交联点的影响,“高分子更大的链段”的长度和运动范围都受到影响,低于老化前的水平,运动的损耗也随之降低,因而使代表运动损耗的  $\tan\delta$  曲线的  $\alpha$  峰值降低<sup>[17]</sup>。这些新生的交联点越多,  $\tan\delta$  曲线的  $\alpha$  峰值越低。此外,另一个原因是,因为填料/基体的黏结变弱,也导致  $\alpha$  峰值降低。由此看来,样品  $\tan\delta$  曲线的  $\alpha$  峰值可以用来表征 HTPB 推进剂的老化程度。

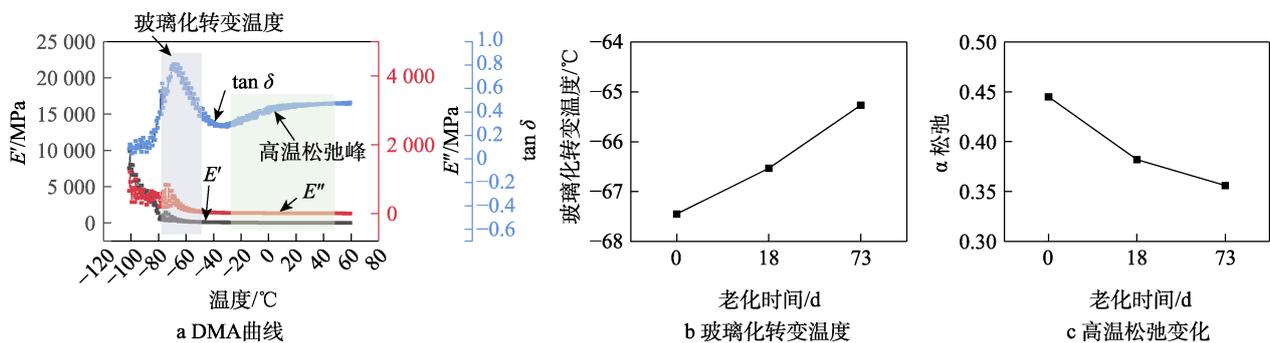


图 2 原始样品在不同频率下的动态黏弹谱法测试 (DMA) 曲线以及不同老化时间下的玻璃化转变温度和高温松弛变化  
Fig.2 Dynamic viscoelastic spectroscopy (DMA) curves at three frequencies of pure specimen, and glass transition temperature changes and high temperature relaxation changes at different aging days: a) DMA curves; b) glass transition temperature; c) high temperature relaxation changes

在不同老化时间下,高温加速老化样品中凝胶的质量分数与老化时间的关系如图 3 所示。凝胶的质量分数反映了凝胶/溶胶的比例,其升高与降低反映了交联点的增加与破坏。可以看到,初始样品中,凝胶的质量分数在 89% 左右,随着高温老化时间的延长,

凝胶质量分数逐渐上升,正与前文观察到的现象相一致。70 °C 下高温贮存加速了固体推进剂的氧化交联,从而导致交联程度的增加,这正是凝胶含量提高的主要因素<sup>[18]</sup>。在高温老化 73 d 时,凝胶的质量分数保持在 95% 附近。

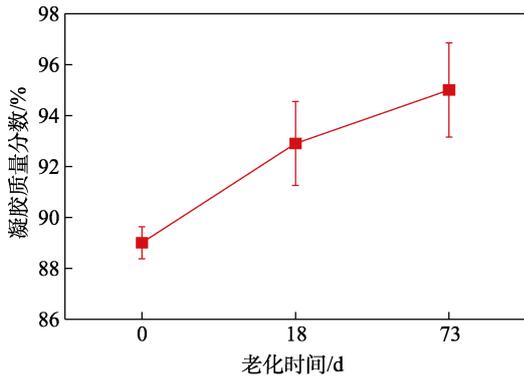


图3 不同老化时间下样品凝胶含量与老化时间的关系  
Fig.3 Relationship of gel content and aging time of propellant under different aging days

基于上述现象可知,由于高温氧化交联导致HTPB样品交联结构的增加,从而解释了力学性能的变化,但这是否体现在表面形貌变化上是值得研究的<sup>[19]</sup>。高温加速老化前后样品的表面形貌变化如图4所示。由图4可知,未老化的HTPB推进剂黏合剂基体与固体填料界面模糊,氧化剂等固体填料与黏合剂黏结较好,基体与填料几乎形成了一个整体,无明显脱湿现象。

对于高温老化73 d的样品,表面固体填料与基体间出现了相对明显的界面,反映了氧化剂、铝粉等固体填料与黏合剂的黏结变差,部分固体填料与黏合剂基体出现轻微脱湿现象。

由于推进剂高温加速老化过程中其表面和内部的分子结构变化可能是不同的,因此利用红外谱图对化学结构的变化进行了研究,结果如图5所示。典型特征吸收峰的变化如下:3 280 cm<sup>-1</sup>处出现了明显的羟基特征吸收峰,而在1 740 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰则表明了羰基基团的存在,1 050 cm<sup>-1</sup>的特征峰显示了C—O的变化<sup>[20-21]</sup>。对于样品表面,其在3 280 cm<sup>-1</sup>处的羟基以及在1 740 cm<sup>-1</sup>处的羰基含量先下降、后上升,说明其老化73 d时发生了氧化,并有多重氧化产物产生。由于HTPB烯丙基上的碳-氢键键能较小,烯丙基氢容易受氧的攻击,形成氢过氧化物,然后分解成自由基,进一步引起降解和交联反应,从而形成不饱和的醛、酸和醇等产物。进一步对内部结构的变化进行表征发现,其与表面结构的变化不同,其内部3种特征基团的含量都随老化时间的增加而上升,这说明其内部也逐渐发生氧化反应<sup>[22]</sup>。

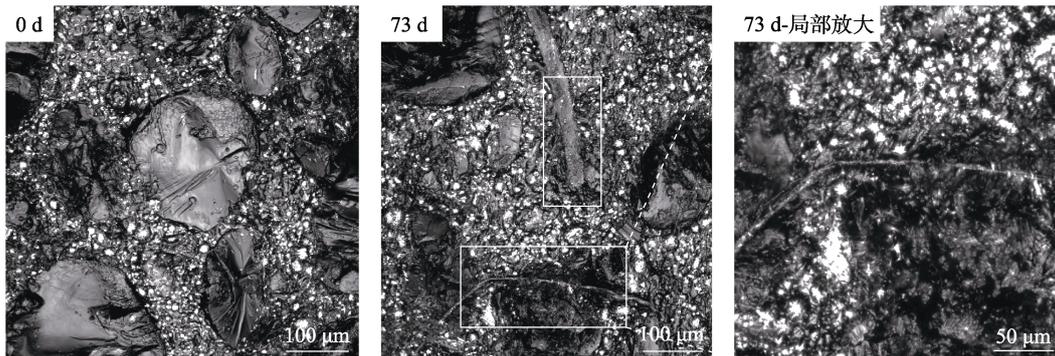


图4 加速老化前后的样品表面形貌变化  
Fig.4 Surface morphology changes of propellant samples before and after accelerated aging

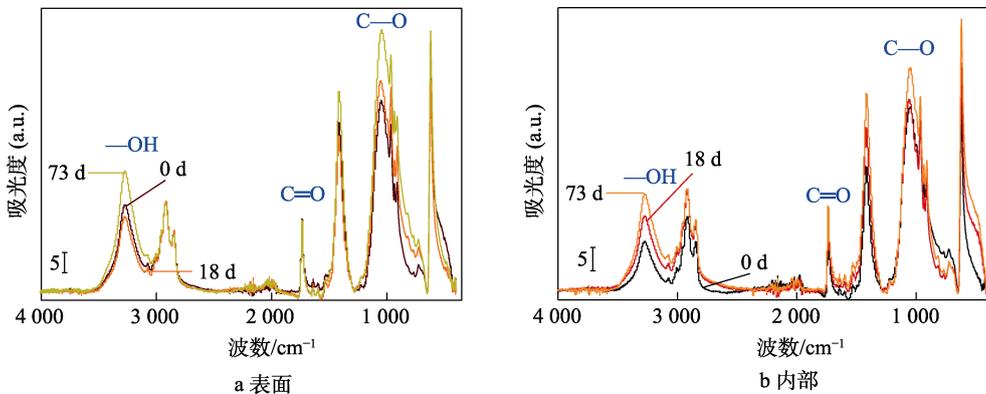


图5 样品老化前后的红外光谱图  
Fig.5 Infrared spectra of samples before and after aging: a) surface; b) interior

为了进一步验证上述发现,对固体推进剂老化过程中的表面元素含量进行了表征,如图6和图7所示。从原始样品的X-光电子能谱图中可以看出,HTPB固

体推进剂的主要元素为C、N、O、Cl。由图7可以发现,随着老化时间增加到73 d,O、N、Cl元素的含量与未老化的样品相比皆有明显增加,这和表面红

外基团的变化规律一致。因此可以推测, 在固体推进剂样品贮存老化过程中, 主要效应为氧化交联, 同时在老化期间,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  开始缓慢分解出  $\text{HClO}_4$  和  $\text{NH}_3$  [23-24], 并逐渐进入表面层, 使得最终老化 73 d 固体推进剂样品表面的 N 元素和 Cl 元素含量增大。同时,  $\text{HClO}_4$  攻击了固体推进剂中的不饱和碳碳双键, 使之氧化交联生成羧酸或断链生成环氧乙烷, 导致了 O 元素含量的增大。

在上述室内加速老化样品微观结构和宏观性能的系统表征基础上, 对其老化过程中不同微观结构参数与宏观性能之间的关联 (构效关系) 进行了研究, 如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 拉伸强度与其玻璃化转变温度呈现较强的线性正相关, 其相关性可以用  $y=0.075x+5.68$  来表示, 相关系数为 0.99。因此可以看出, 玻璃化转变温度是一个相关性较强的微观参数

指标, 可用来反映其宏观拉伸强度变化 [25]。从图 7b 可以看出, 断裂应变与其玻璃化转变温度基本呈现线

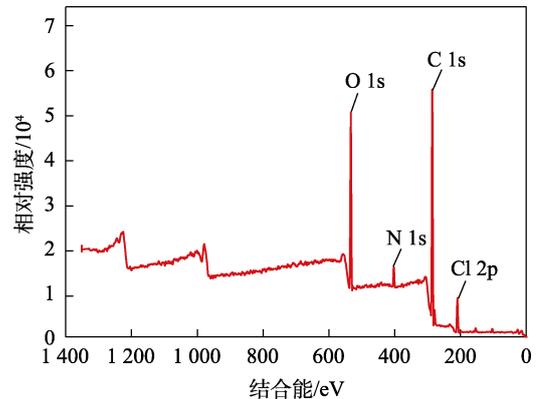


图 6 原始样品的 X-光电子能谱图  
Fig.6 X-photoelectron spectrum of original sample

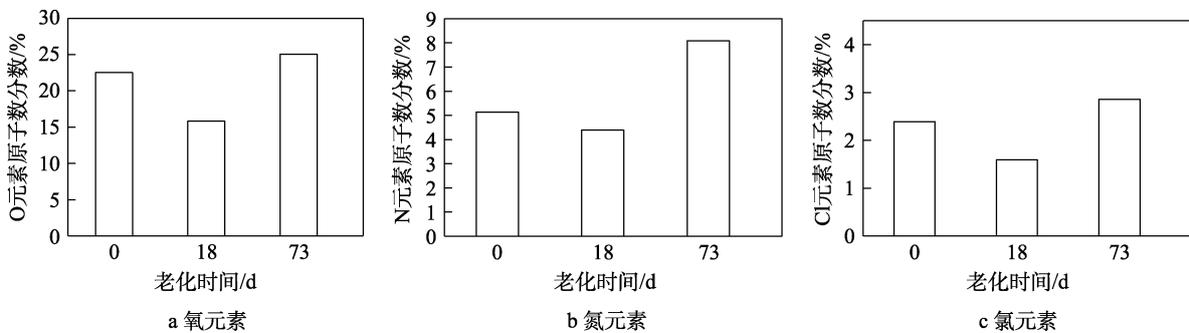


图 7 不同元素含量与老化时间的关系

Fig.7 Relationship between element content and accelerated aging time: a) oxygen; b) nitrogen; c) chlorine

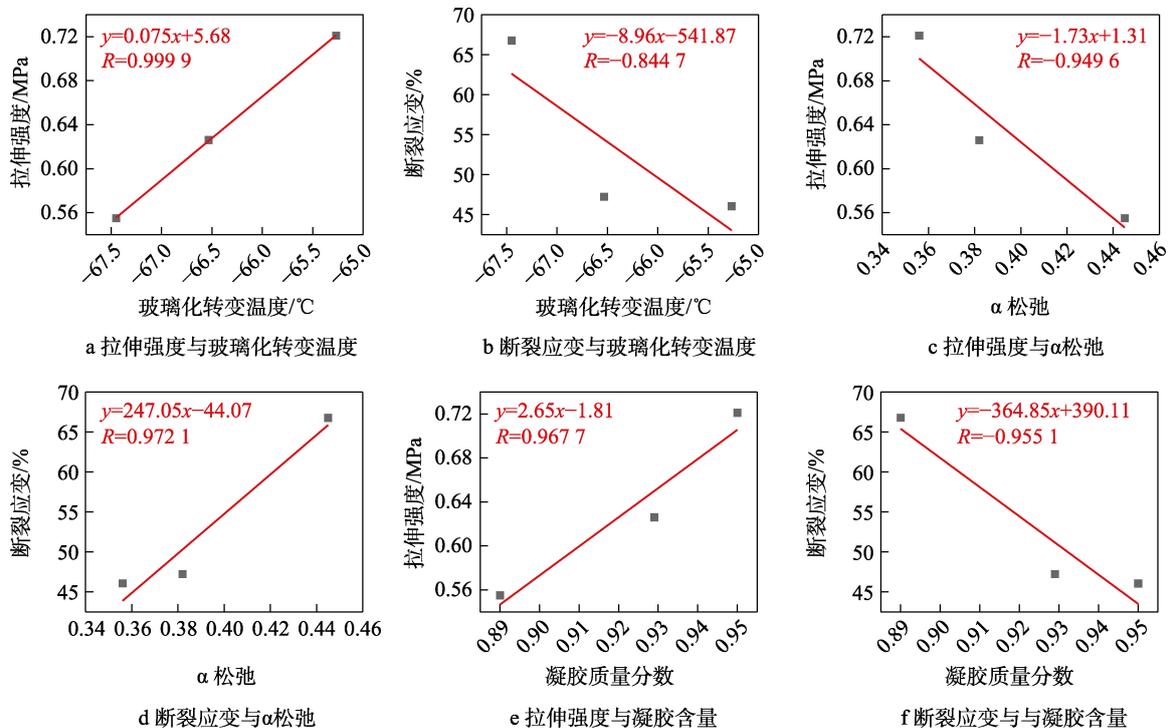


图 8 微观结构变化与宏观力学性能之间的关联关系

Fig.8 Correlation between microstructural changes and macroscopic mechanical properties: a) tensile strength and glass transition temperature; b) fracture strain and glass transition temperature; c) tensile strength and  $\alpha$  relaxation; d) fracture strain and  $\alpha$  relaxation; e) tensile strength and gel content; f) fracture strain and gel content

性负相关,其相关性可以用 $y=-8.96x-541.87$ 来表示,相关系数为-0.84。类似地,也可以用 $\alpha$ 松弛峰的峰值变化以及凝胶含量建立其与宏观力学性能的相关性,其结果如图7c~f所示。综上得出结论,可以通过微观结构的表征初步推断其宏观性能的变化。对于HTPB推进剂,其 $t_g$ 、 $\alpha$ 松弛以及凝胶含量可以作为相关性较强的指标来推断宏观性能,其中 $t_g$ 与拉伸强度的关联性最强。

### 3 结论

本文主要探讨了端羟基聚丁二烯(HTPB)在室内高温加速老化过程中的性能变化及其内在的分子机理和失效规律。研究集中于宏观性能的变化、分子链运动以及分子结构的改变,并建立了微观结构与宏观性能之间的联系。研究结果表明,随着老化时间的延长,HTPB样品的拉伸强度逐渐上升,而断裂伸长率则下降,这一现象主要归因于氧化交联反应的发生,且该反应不仅发生在材料内部,也会在表面形成。此外, $t_g$ 、 $\alpha$ 松弛和凝胶含量等微观结构特征参数能够有效反映宏观性能的变化,其中 $t_g$ 与拉伸强度之间存在较强的相关性。这些研究成果为理解HTPB在高温加速老化条件下的性能变化和失效机制提供了重要理论依据,有助于推进剂材料在长期服役过程中的性能监测和评估。

#### 参考文献:

- [1] CHATURVEDI S, DAVE P N. Solid Propellants: AP/HTPB Composite Propellants[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8): 2061-2068.
- [2] CHRISTIANSEN A, LAYTON L, CARPENTER R. HTPB Propellant Aging[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1981, 18(3): 211-215.
- [3] DE SOUZA DEFANTI B F, DE MENDONÇA-FILHO L G, NICHELE J. Effect of Ageing on the Combustion of Single Base Propellants[J]. Combustion and Flame, 2020, 221: 212-218.
- [4] 常新龙, 龙兵, 胡宽, 等. 固体推进剂断裂性能研究进展[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 6-13.  
CHANG X L, LONG B, HU K, et al. Progress of Study on the Fracture Performance of Solid Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 6-13.
- [5] 张盼, 杨华, 李婧宜, 等. 丁羟推进剂老化研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2024, 22(2): 8-15.  
ZHANG P, YANG H, LI J Y, et al. Progress in Aging Research of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Propellant[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2024, 22(2): 8-15.
- [6] QUAGLIANO AMADO J C, ROSS P G, MATTOS SILVA MURAKAMI L, et al. Properties of Hydroxyl-Terminal Polybutadiene (HTPB) and Its Use as a Liner and Binder for Composite Propellants: A Review of Recent Advances[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(5): 1-19.
- [7] DUAN L G, WANG X R, QIANG H F, et al. Monitoring of Aging of Solid-Rocket-Motor HTPB Propellant Grains Using an Electromechanical Impedance Method[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(11): 2-16.
- [8] GONÇALVES R F B, IWAMA E N, DOMINGUES M G, et al. Shelf-Life Analysis of Solid Rocket Engine Using HTPB/AP Based on Kinetic-Chemical Parameters of DSC Analysis and Burn on a Test Bench[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 42(1): 54.
- [9] 吴成丰, 傅学金, 胡少青, 等. 复合固体推进剂微观损伤演化研究进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(12): 1043-1058.  
WU C F, FU X J, HU S Q, et al. Research Progress on Meso-Damage Evolution of Composite Solid Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(12): 1043-1058.
- [10] WANG Z J, QIANG H F. Mechanical Properties of Thermal Aged HTPB Composite Solid Propellant under Confining Pressure[J]. Defence Technology, 2022, 18(4): 618-625.
- [11] DENNIS C, BOJKO B. On the Combustion of Heterogeneous AP/HTPB Composite Propellants: A Review[J]. Fuel, 2019, 254: 115646.
- [12] LI J, TIAN T, ZHANG G, et al. Reaction Model for the Aging and Shelf - Life Prediction of Double - Base Propellant SF - 3[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(6): 986-994.
- [13] SELVAKUMAR S, RAO G S, REDDY K A. Diffusion of Labile Chemical Species in HTPB and HTPB-XT Solid Propellants and Its Effect over Solid Rocket Motor Properties on Aging — A Study[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(5): 782-790.
- [14] WANG Y F, LI G C, LI J F, et al. Experimental Research on Accelerated Aging of Solid Propellant under Alternating Temperature[J]. FirePhysChem, 2022, 2(4): 374-381.
- [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 F F, CHANG H, ZHANG L J, 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] 刘子如, 张腊莹, 衡淑云, 等. 双基推进剂的玻璃化温度[J]. 火炸药学报, 2009, 32(2): 56-59.  
LIU Z R, ZHANG (L /X)Y, HENG S Y, et al. The Glass Transition Temperature for Double Base Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(2): 56-59.
- [17] HALILOVIÄ† N, KAUÄ IÄ -Ä KUFCA M, ADEMOVIÄ†

- Z, et al. Analysis of Stability of Naturally Aged Single Base Propellants[J]. African Journal of Pure and Applied Chemistry, 2021, 15(1): 1-7.
- [18] KONG L Z, DONG K H, TANG Y H, et al. Molecular Simulation Study on the Aging Mechanism of NEPE Propellant Matrix[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1792.
- [19] LIANG Y L, ZHANG M, REN H, et al. Comprehensive Evaluation of the Accelerated Aging Law of NEPE Propellants[J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020: 8414505.
- [20] PAN Z Q, LIU T Y. Storage Lifetime Prediction of Composite Solid Propellant Based on Šesták-Berggren Model[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(3): 468-476.
- [21] WANG J J, CHENG J M, LEI M, et al. Mechanical Properties and Constitutive Model of a Composite Solid Propellant under the Synergistic Effects of Accelerated Aging Time, Pre-Strain, and Damage Growth[J]. Mechanics of Materials, 2020, 148: 103453.
- [22] 苗建波, 朱宏春, 左国平, 等. DMA 损耗因子法研究 HTPB/Al/AP 推进剂热老化动力学[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 394-398.
- MIAO J B, ZHU H C, ZUO G P, et al. Thermal Aging Kinetics of HTPB/Al/AP Propellant Investigated by DMA Loss Factor[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(3): 394-398.
- [23] 王昕远, 张亚俊, 隋欣, 等. 基于红外光谱的 HTPB 推进剂老化机理[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(4): 471-475.
- WANG X Y, ZHANG Y J, SUI X, et al. Aging Mechanism of HTPB Propellant Based on Infrared Spectrum[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(4): 471-475.
- [24] KUMAR A, SADAVARTE V S, SANTOSH MADA S S N M, et al. Studies on the Effect of Ageing on Thermal, Ballistic and Mechanical Properties of Advanced Energetic Propellants[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(4): 626-635.
- [25] 张旭东, 董可海, 曲凯, 等. 湿老化对丁羟推进剂力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2012, 35(3): 71-74.
- ZHANG X D, DONG K H, QU K, et al. Effect of Moisture Ageing on Mechanical Performance of HTPB Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(3): 71-74.