

文章编号:1006-9941(2026)02-0130-08

基于分形维数的老化 NEPE 推进剂拉伸损伤演化表征与分析

张涛¹,姬永超²,李卓¹,陈家兴³,刘晓晗⁴,田丽敏¹,梁文龙¹,莫世良¹

(1. 内蒙古工业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 3. 中国航天科工集团第六研究院四十一所, 内蒙古 呼和浩特 010000; 4. 中国航天科工集团第六研究院四十六所, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 为定量研究老化前后硝酸酯增塑聚醚(Nitrate Ester Plasticized Polyether, NEPE)推进剂在拉伸下的表面细观损伤,开展了不同老化时间(0, 7, 40, 80 d)的热加速老化实验,采用场发射电子显微镜(FE-SEM)配合原位拉伸台进行了原位拉伸实验并数字化处理了拍摄图像。采用分形维数定量表征分析了推进剂不同老化阶段细观损伤演化过程,研究了老化前后推进剂孔隙率法与分形维数法在细观损伤表征上的差异。结果表明:分形维数能有效表征不同老化阶段 NEPE 推进剂的表现损伤过程。当伸长率小于 20% 时,分形维数随伸长率增加而增大,且增速较快;当伸长率在 20%~60% 时,分形维数仍随伸长率增加而增大,但增速放缓,并发现老化时间越长,分形维数与伸长率的线性关系更显著的规律;当伸长率大于 60% 后,不同老化阶段推进剂分形维数随伸长率呈不规则变化。孔隙率法与分形维数法对比表征老化前后推进剂拉伸过程存在差异,且老化后差异更加显著,孔隙率法主要量化孔隙面积占比,分形维数法则表征表面形貌的粗糙度与复杂度特征。

关键词: NEPE 推进剂;老化;细观损伤;分形维数;原位拉伸

中图分类号: TJ55;V512

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025163

0 引言

固体推进剂是一种高固体颗粒填充比的含能复合材料。硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂是一种常见的固体推进剂,其因具有较高能量特性与良好力学性能,备受关注。在长期贮存和复杂载荷环境下,NEPE 推进剂内部细观损伤的演化及其与老化过程的耦合效应,已成为制约高能推进剂工程应用的核心瓶颈。因此,深入揭示细观损伤机制与老化行为规律,对预测装药结构寿命、保障战略武器系统战备状态具有重大意义。

目前,对于 NEPE 推进剂细观损伤机制的研究,多集中于颗粒脱粘现象。李敬明等^[1]在静态拉伸条件下对 NEPE 推进剂进行了原位观察,发现拉伸状态下大填充颗粒会出现界面脱粘,形成微裂纹,向大填充颗粒处扩展。郭翔等^[2]也采用此法获得了 NEPE 推进剂/衬

层界面变形、破坏的细观图,对其细观破坏机理进行分析,发现拉伸时会导致 NEPE 推进剂/衬层粘界面中的基体拉伸断裂,NEPE 推进剂固体颗粒与基体的脱粘,大颗粒在拉伸时脱湿比小颗粒严重;粘合剂基体损伤和界面脱粘等共同作用导致微裂纹汇集引起界面失效,破坏 NEPE 推进剂/衬层粘界面。在 NEPE 推进剂细观损伤模拟方面,侯宇菲等^[3]建立基于多项式-梯形内聚力法则的细观模型,模拟 NEPE 推进剂在拉伸载荷下颗粒/基体界面脱湿过程,发现颗粒与基体界面脱湿引起基体内部形成高应力区,高应力区在载荷作用下形成裂纹,进而导致推进剂开裂。庞爱民等^[4]对 NEPE 推进剂/衬层界面的分子动力学模拟(MD)研究做出了总结,并通过反应分子动力学明确了影响界面粘接的主副反应与维持界面良好粘接性能的关键。现有研究揭示了颗粒/界面脱粘是 NEPE 推进剂在拉伸载荷下细观损伤和失效的关键机制,且大颗粒的脱粘行为更为显著,奠定了 NEPE 推进剂的细观损伤研究基础。

对于老化后 NEPE 推进剂研究,化学老化驱动、多尺度建模、细观结构响应等方面都是近年来研究热点。在化学老化驱动研究方面,Milekhin 等^[5]通过气相色谱

收稿日期: 2025-07-11; 修回日期: 2025-09-30

网络出版日期: 2025-12-17

作者简介: 张涛(2000-),男,硕士研究生,主要从事固体推进剂力学性能相关研究。e-mail: 15184720014@163.com

通信联系人: 李卓(1966-),男,教授,博导,主要从事固体火箭发动机设计分析研究。e-mail: 704028389@qq.com

引用本文:张涛,姬永超,李卓,等.基于分形维数的老化 NEPE 推进剂拉伸损伤演化表征与分析[J].含能材料,2026,34(2):130-137.

ZHANG Tao, Ji Yong-chao, Li Zhuo, et al. Characterization and Analysis of Tensile Damage Evolution in Aged NEPE Propellant Based on Fractal Dimension[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2026, 34(2):130-137.

谱-质谱联用证实,硝酸酯增塑剂(NG/BTTN)在 50 °C 加速老化中挥发速率每月达 0.12%,导致基体塑化能力下降。在多尺度建模方面,闫志鸿等^[6]研究了 NEPE 推进剂老化过程中抗拉强度的变化规律,对加速老化后的样品进行了单向拉伸试验和傅里叶红外光谱试验。基于试验结果采用二阶高斯拟合和对数拟合方法,建立了老化过程中抗拉强度变化的预测模型。微观结构响应作为揭示 NEPE 推进剂老化损伤机制的路径之一,其定量表征已成为当前研究热点。目前,常采用方法是孔隙率法^[7]。此外,随着分形理论^[8]发展迅速,分形维数也用于 NEPE 推进剂的定量研究。陈煜等^[9]采用原位拉伸扫描电镜和数字图像分析相结合的方法对 NEPE 推进剂微观结构进行了分析,发现分形维数的变化与损伤演化具有关联性,且损伤积累会使材料内部结构变化更趋复杂。

综上所述,分形维数已被证明适用于 NEPE 推进剂微观损伤表征,但未见其应用于老化后 NEPE 推进剂的损伤研究,也未知老化前后推进剂孔隙率与分形维数在微观损伤表征上的差异。为此,本研究针对不同老化阶段的 NEPE 推进剂开展原位拉伸试验,通过场发射电子显微镜观测记录试样表观形貌并采用数字图像技术对采集图像进行处理。基于分形维数对不同老化阶段的推进剂拉伸损伤进行量化分析,并将老化前后推进剂拉伸过程使用分形维数法与孔隙率法进行对比,为表征不同老化阶段 NEPE 推进剂微观损伤过程提供参考。

1 实验部分

1.1 实验设备

采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的场发射扫描电子显微镜,通过静电-磁复合透镜技术实现超高分辨率与优异材料对比度,并配合最大 5 kN 原位拉伸台进行原位拉伸实验。

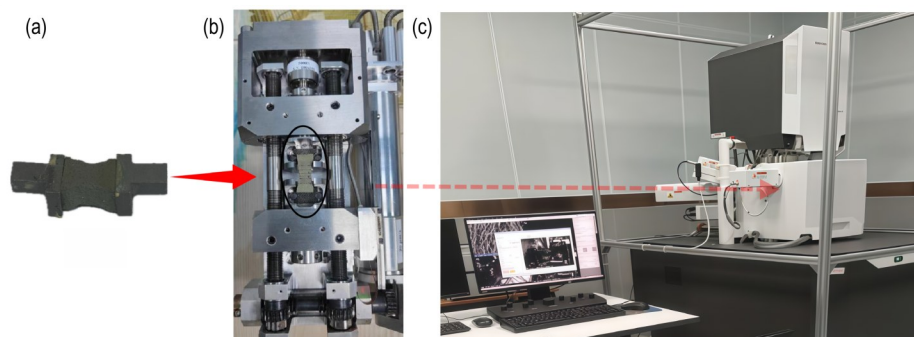


图2 实验装置图:(a)试样;(b)拉伸台;(c)电脑和场发射扫描电镜

Fig.2 Schematic diagram of the experimental procedure: (a) Specimen, (b) Tensile machine, (c) Computer and FE-SEM

1.2 样品制备

实验样品为某研究所提供的 NEPE 推进剂,基本组分:72% 固体颗粒(AP/Al/HMX/RDX),25% 黏合剂/增塑剂,3% 催化剂。老化过程参考 QJ2328A-2005^[10],将 NEPE 推进剂试样放入 70 °C 油浴保温箱中加速老化 0,7,40,80 d。制样及拉伸过程参考 QJ924-85^[11],试样如图 1 所示,两侧通过航天级胶粘剂与铝制夹具粘接,确保界面结合强度高于推进剂本体且不引入额外影响。命名 4 种不同老化状态样品分别为 NEPE-0、NEPE-7、NEPE-40、NEPE-80,代表未老化样品、老化 7 d 样品、老化 40 d 样品和老化 80 d 的样品。

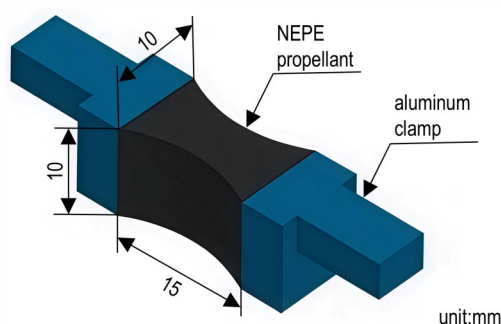


图1 推进剂与铝制夹头粘接而成的试样

Fig.1 A specimen formed by the propellant bonded to an aluminum clamp

1.3 拉伸实验

将试件固定在拉伸夹具上,左右两端置于夹具凹槽内。将拉伸台整体置于场发射扫描电子显微镜样品室(图 2)。拉伸速率设为 $20 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,选取 3~4 个基础拍摄位置,伸长率每增加约 10%,采用 800 和 1600 放大倍数进行拍摄,持续拉伸直至试样断裂。

1.4 表征方法的计算

1.4.1 分形维数的计算

计算 NEPE 推进剂拉伸中分形维数时,运用扫描电镜进行拍摄,将拍摄的图像转化为黑白二值图。在

调整黑白二值图时, 拉伸速率和放大倍数差异会导致扫描电镜图像的灰度与亮度产生变化, 故以图像中最显著的孔穴或裂纹为参考, 选择合适的阈值并持续调整, 尽可能消除影响结果的噪点, 直至孔穴或裂纹边缘清晰为止^[12-13]。计算方法为: 通过差分盒维数法计算其分形维数, 采用边长为 M 的正方形网格, 统计包含裂纹的网格数 $N(M)$, 通过改变网格尺寸 M , 进行多次计算绘制 $\lg N(M)$ - $\lg M$ 关系曲线。若该曲线呈线性特征, 则表明裂纹扩展具有自相似性, 可通过分形几何理论进行研究^[8]。分形维数 D 可由公式(1)计算:

$$D = \left| \lg N(M) / \lg M \right| \quad (1)$$

1.4.2 孔隙率的计算

孔隙率分为平均孔隙率和表观孔隙率, 平均孔隙率用于研究被测试件整体的孔隙情况, 而表观孔隙率注重对推进剂局部表观的面积定量表征。本研究的推进剂表观与内部成分相同, 故所述孔隙率均为表观孔隙率。计算孔隙率时, 图像需转化为黑白二值图, 转化处理方式与处理分形维数黑白二值图相同, 统计孔穴和裂纹面积占比, 即可计算出孔隙率。

2 结果与讨论

2.1 基于分形维数的微观分析

为研究不同老化阶段下 NEPE 推进剂的力学性能, 并对比其与分形维数表征的差异性, 对该材料开展了宏观拉伸测试, 结果如图 3 所示。结果表明, 老化时间越长, 推进剂模量越大, 极限应变越小, 这说明 NEPE 推进剂老化过程中基体内部发生了交联反应, 可能还伴随着增塑剂损耗等机制, 且这种硬化势会随着老化时间的延长而加剧^[14-15]。

按照相同放大倍数图像计算了分形维数并得到不同老化天数推进剂在不同伸长率下的 $\lg N(M)$ - $\lg M$ 曲线, 如图 4 所示。结果表明, $\lg N(M)$ 与 $\lg M$ 的线性回

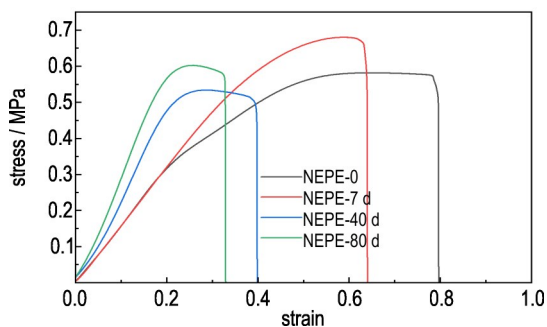
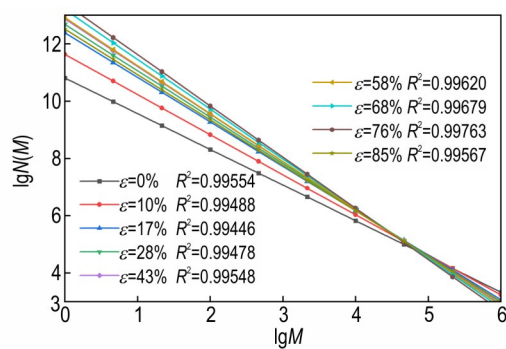
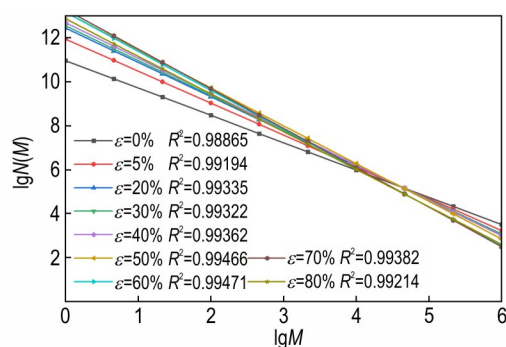


图 3 不同老化天数推进剂应力应变对比

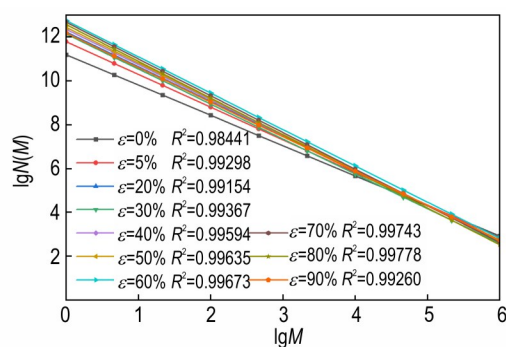
Fig.3 Comparison of stress-strain curves for propellants with different aging days



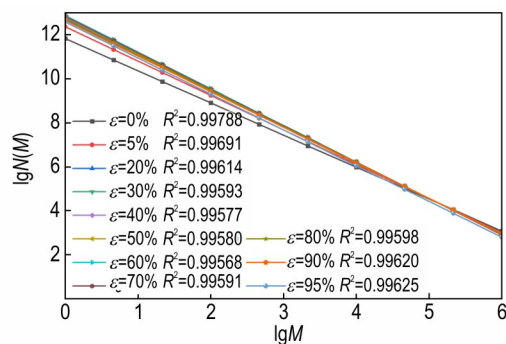
a. NEPE-0



b. NEPE-7



c. NEPE-40



d. NEPE-80

图 4 不同老化天数推进剂在不同伸长率下的 $\lg N(M)$ - $\lg M$ 曲线

Fig.4 $\lg N(M)$ - $\lg M$ curves of propellants with different elongation with different aging days

归拟合度 R^2 均在 0.98 以上,故可用分形理论研究^[9]。

为了更加直观观察分形维数随伸长率的变化过程,基于图 4 计算了不同老化天数推进剂分形维数随伸长率变化并添加了部分表观图像,和伸长率在 20%~60% 阶段拟合曲线(图 5)。

首先对比分析 NEPE-0 和 NEPE-7(图 5a~b),初始值均为 1.25 左右,随伸长率增加均呈现“快速增长-增速放缓-二次加速-下降”特征。这两种情况下对应的表观几何复杂程度初始增速较快,当伸长率超过 17%~20% 后增速趋缓。NEPE-0 在伸长率超过 58% 后表观几何复杂程度再次快速上升;NEPE-7 在伸长率超过 40% 即出现快速上升,且伸长率超过 50% 后增速再次放缓;当伸长率超过 70%~76%,两种试件分形维数开始下降。对比发现两种试件分形维数随伸长率变化趋势基本一致,无较大变化。

其次,对比长期老化(NEPE-40 和 NEPE-80)与短期老化及未老化(NEPE-0 和 NEPE-7)的差异(图 5c~d)。由图 5 可知,NEPE-40 和 NEPE-80 的初始分形维数分别为 1.3800 和 1.4596,均高于 NEPE-0 和 NEPE-7。这表明长期老化后,NEPE-40 和 NEPE-80 因成分发生氧

化、硝化、挥发等物理化学反应产生板结硬化^[16],表面初始裂纹增多,导致几何复杂程度提高,进而使分形维数增大。在伸长率为 0%~20% 阶段,NEPE-40 和 NEPE-80 的分形维数增长较快,其变化趋势与 NEPE-0 和 NEPE-7 一致;进入 20%~60% 伸长率阶段,两者分形维数的增长速度放缓,分析此阶段分形维数随伸长率的变化发现:相较于 NEPE-0 和 NEPE-7,NEPE-40 和 NEPE-80 的分形维数与伸长率之间拟合曲线的相关系数更高,呈现出更高的线性相关性,且 NEPE-80 相关性较 NEPE-40 更为显著;当伸长率超过 60% 后(图 5c),NEPE-40 的分形维数持续上升,在 80% 伸长率时达到峰值 1.6759,随后开始下降,至 90% 时降至 1.5743;NEPE-80 在伸长率超过 60% 后(图 5d),分形维数逐渐降低,此现象表明,随着拉伸进行,裂纹汇聚效应显著,缺陷合并形成宏观裂隙,导致在现有观测尺度下表观几何粗糙程度下降,形貌趋于平整,进而使分形维数缓降。NEPE-80 在 95% 伸长率时发生宏观断裂,此时分形维数值为 1.6314。

最后,值得注意的是现有尺度下 NEPE-40 和 NEPE-80 的最大分形维数(1.6759 和 1.6631)值均低

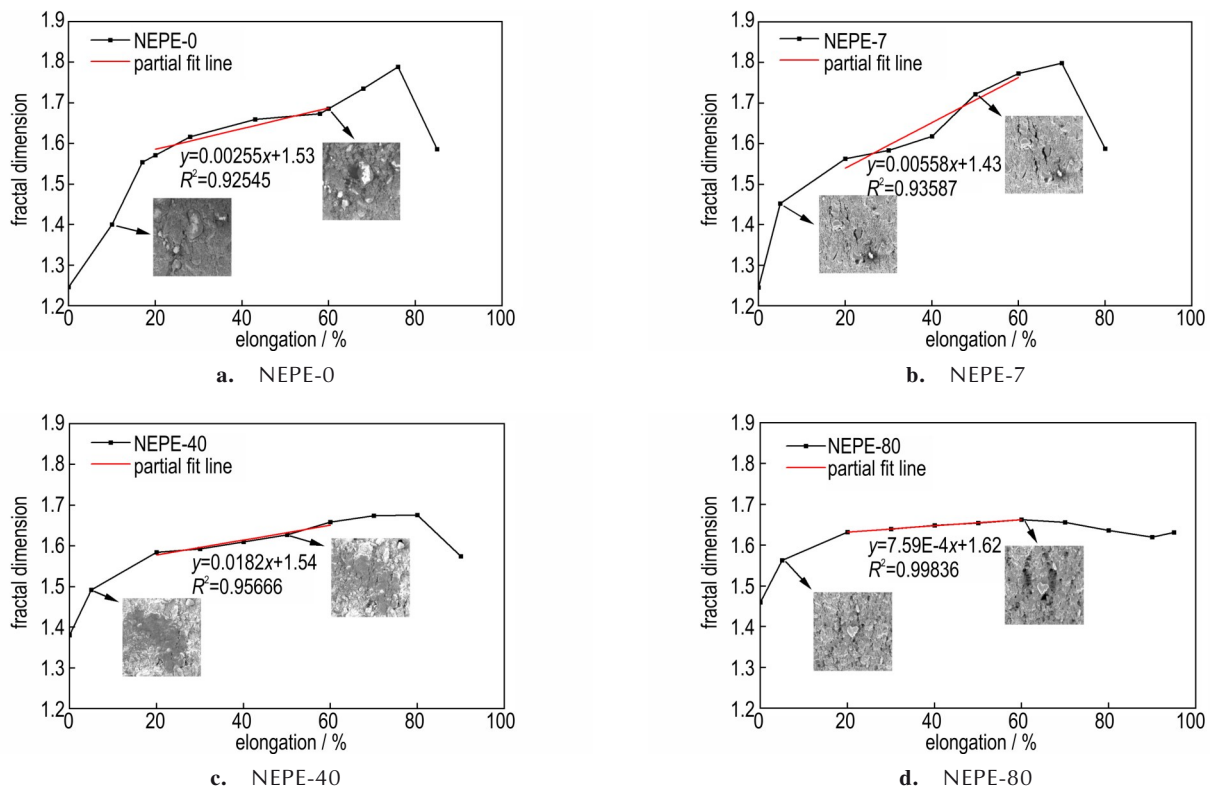


图 5 不同老化天数推进剂拉伸中分形维数随伸长率的变化曲线及部分对应图像

Fig.5 Fractal dimension versus elongation ratio curves with representative images for aged propellant samples under tensile testing with different aging days

于 NEPE-0 和 NEPE-7 (1.7889 和 1.7980), 这由于长期氧化交联使黏合剂基体硬化脆化, 抑制裂纹扩展速度, 从而降低几何复杂程度的演变速率。因此, 就粗糙复杂度而言, 现有尺度下长期老化试件在拉伸过程中达到的“最复杂粗糙”状态弱于未老化及短期老化试件。对比图 5 与图 3 中不同老化天数下 NEPE 推进剂的应力应变曲线可知, 应力随应变增加而持续增大, 该趋势与图 5 中分形维数的变化特征相似, 然而, 应力应变曲线难以细致反映推进剂的表现损伤变化。由图 5 可见, 随着老化时间延长, 在部分拉伸阶段中分形维数表现出更强的线性相关性, 从而能够更精细地表征推进剂表现变化过程。可见分形维数法较应力应变曲线更适合表征不同老化天数下推进剂在拉伸过程中的表现损伤演化行为。

为了分析不同老化天数 NEPE 推进剂分形维数在拉伸过程中的动态演变, 依据不同老化天数 NEPE 推进剂拉伸中分形维数随伸长率的变化曲线, 拟合出不同老化天数 NEPE 推进剂拉伸过程中伸长率与分形维数一阶导数的关系曲线, 如图 6 所示。结果表明, NEPE-0 分形维数随伸长率的一阶导数在 10% 时达到最大值, 随后开始下降, 在 50% 左右又开始增大; NEPE-7 分形维数随伸长率的一阶导数从初始的 0.04 左右开始下降, 在伸长率为 30% 左右时出现拐点; NEPE-40 分形维数变化率从初始 0.02 附近开始下降, 当伸长率达到 25% 左右时曲线趋于平稳; NEPE-80 与 NEPE-40 前半段较为相似, 其分形维数变化率也从 0.02 开始下降, 当伸长率处于 20%~60% 时, 分形维数变化率略大于 0, 当伸长率大于 80% 后, 分形维数变化率缓慢增大。

综上所述, 不同老化天数的 4 种试样刚开始拉伸

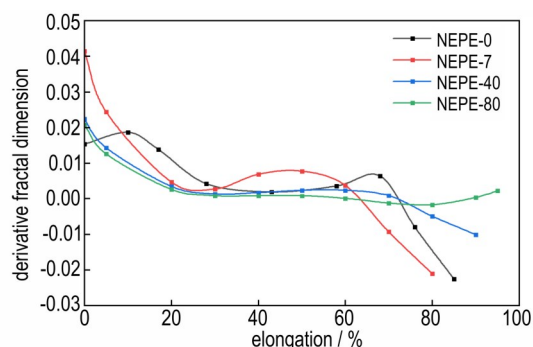


图 6 不同老化天数推进剂伸长率与分形维数的一阶导数曲线图

Fig.6 Curves of the first derivative of fractal dimension and elongation during stretching for propellants with different aging days

时的分形维数一阶导数较大, 随后开始下降。这是由于此阶段 NEPE 推进剂中裂纹扩展主要是破碎的 AP 颗粒被扯离形成的孔穴以及粘合剂的弹性扩展^[12, 17-18]。此外, 经过长期老化 (40 d、80 d) 后, 分形维数一阶导数随伸长率变化在 20%~60% 阶段更加平稳, 这是由于试件发生氧化交联、分解、硝化等反应, 特别是增塑剂的分解^[15], 导致推进剂变硬, 从而使裂纹扩展速率随伸长率增大而减缓, 该阶段的裂纹扩展与伸长率呈现更强的线性关系^[19]。

2.2 分形维数法与孔隙率法的对比分析

为研究老化前后 (以 NEPE-0 与 NEPE-80 为例) NEPE 推进剂孔隙率与分形维数在细观损伤表征上的差异, 依据老化前后 NEPE 推进剂原位拉伸相关图像和孔隙率计算方法, 得到了推进剂部分拉伸过程图像及对应的黑白二值图孔隙率统计结果, 结果如图 7 所示, 下方图片为上方图片对应的黑白二值图及孔隙率统计结果。图 7a~b 给出了 NEPE-0 中某颗粒前后变化过程, 其右侧发生脱湿, 拉伸导致其脱湿范围增大; 图 7c~d 给出了 NEPE-80 中某颗粒前后变化过程, 脱湿现象从该颗粒左侧发生, 拉伸导致脱湿产生的孔洞增大, 不仅颗粒与基体间的缝隙增大, 基体自身产生的裂缝也发生了明显扩展^[20]。

基于细观损伤表征结果, 分析老化前后 NEPE 推进剂的孔隙率变化。依据孔隙率计算方法, 得到了 NEPE-0 与 NEPE-80 的孔隙率随伸长率的变化曲线, 结果如图 8 所示。分析发现试件表面存在一定初始缺陷, NEPE-0 初始孔隙率为 1.627%。当伸长率达到 28% 时, 孔隙率升至 5.73%, 孔穴和裂纹变化更为明显; 当伸长率达到 76% 时, 孔隙率升至 25.5% 且已接近极限孔隙率; 当伸长率超过 76% 时, 材料发生宏观断裂, 孔隙率回落至 1.91%, 这是由于断裂应力释放导致裂缝闭合; NEPE-80 初始孔隙率为 1.51%。当伸长率达到 20% 时, 孔隙率增至 4.22%, 随后增长速率减缓; 当伸长率达 40% 时, 孔隙率为 7.26%, 随后增速加快; 伸长率 80% 时孔隙率增至 16.36% 且接近拉伸极限; 伸长率 90% 时孔隙率达峰值 19.24% 并发生宏观断裂; 伸长率 98% 时孔隙率回落至 6.97%。结果表明, 老化前后 NEPE 推进剂孔隙率随拉伸变化过程相似, 均随伸长率增加呈上升趋势, 表明加载过程中试件受力较为均匀, 且不存在明显的应力集中现象, 说明孔隙率可以较好表征老化前后 NEPE 推进剂损伤过程。

现对比老化前推进剂孔隙率与分形维数在细观损伤表征上差异, 整理老化前后推进剂孔隙率与分形维

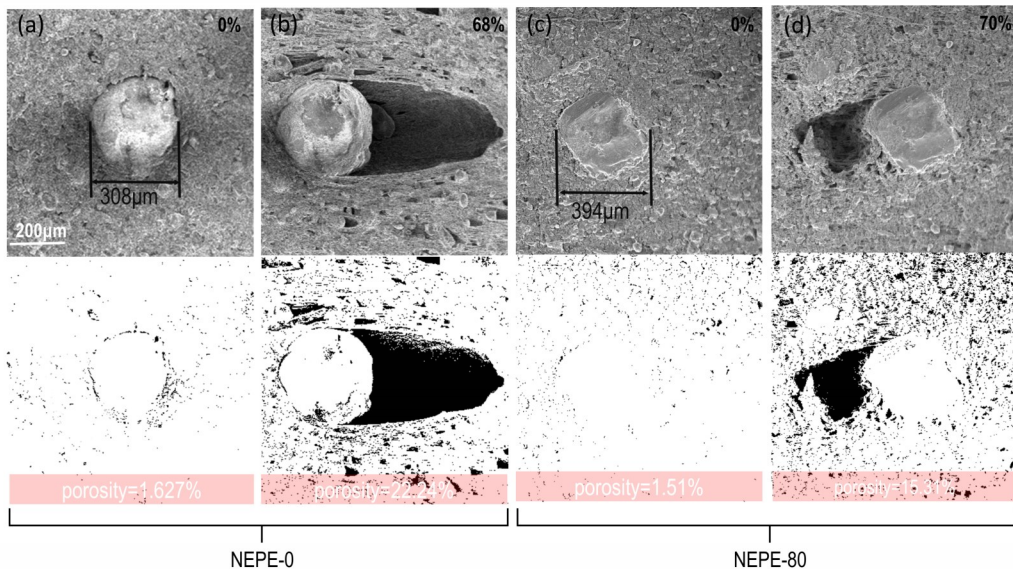


图7 推进剂部分拉伸过程图像及对应的黑白二值图孔隙率统计结果(NEPE-0与NEPE-80)

Fig.7 Images of the elongation process in the propellant section and porosity statistics of the corresponding binary microstructure (NEPE-0 and NEPE-80)

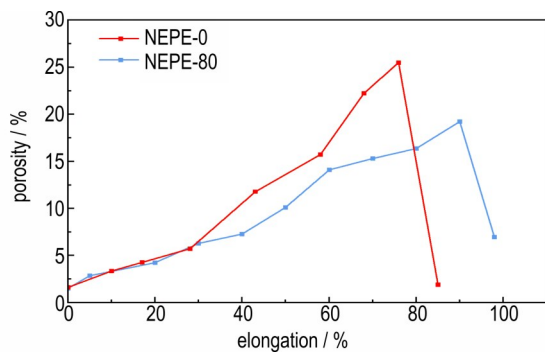


图8 拉伸过程中NEPE-0和NEPE-80孔隙率对比

Fig.8 Comparative curves of propellant porosity during tensile testing (NEPE-0 and NEPE-80)

数, 细观表征结果如图9所示, 其中蓝色曲线为孔隙率法表征曲线, 红色曲线为分形维数法表征曲线。由未老化推进剂孔隙率与分形维数随伸长率变化曲线

图9a可知, 伸长率小于28%时, 孔隙率随伸长率变化较慢; 伸长率在28%~78%时, 孔隙率随伸长率快速增大; 伸长率超过78%后孔隙率下降。然而, 分形维数随伸长率在伸长率小于18%时, 分形维数增速较快; 当伸长率处于18%~58%时, 曲线斜率减小, 分形维数随伸长率缓慢增加; 当伸长率超过58%后, 分形维数继续增大且较前一阶段增速更快, 且在伸长率超过76%后下降。未老化时两种表征结果差异较小, 增长趋势较为一致。

老化后推进剂孔隙率与分形维数在细观损伤表征上差异如图9b所示。孔隙率在伸长率小于90%时呈曲折增长; 当伸长率超过90%后, 孔隙率开始下降并恢复至伸长率为40%时的状态; 分形维数在伸长率小于20%时, 增长速率较快; 伸长率在20%~60%区间

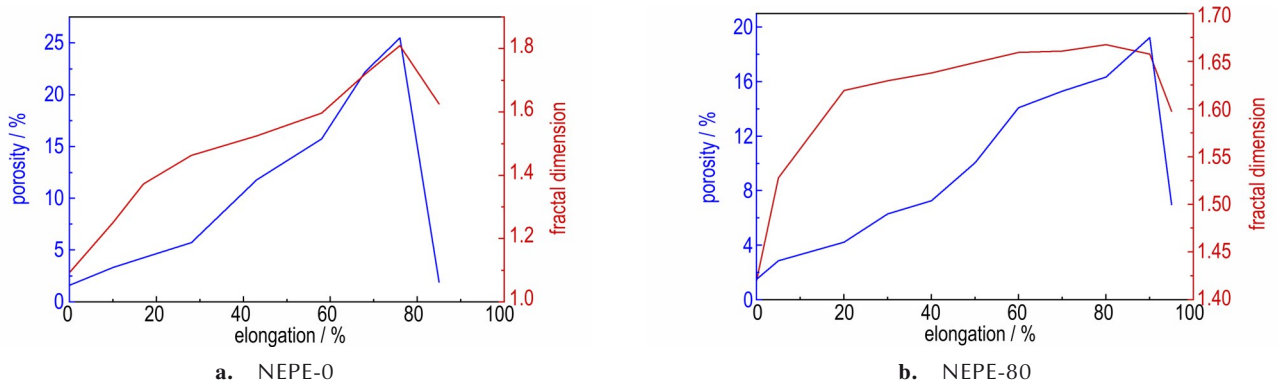


图9 推进剂孔隙率与分形维数随伸长率的曲线对比

Fig.9 Comparative curves of propellant porosity and fractal dimension versus elongation rate

时,分形维数继续增大但增速放缓,出现“弱平台阶段”;当伸长率超过80%后,分形维数下降。结果表明,老化后两种表征结果差异明显增大,增长过程出现不同,在拉伸中段过程,分形维数出现“弱平台阶段”,而孔隙率依然逐步上升,并在后期阶段两者变化趋势出现差异。

进一步分析表明,老化推进剂在未断裂前,孔隙率和分形维数表现为逐步上升,二者差异较小,增长趋势大致相同;而老化后推进剂在未断裂前,孔隙率表现为曲折上升,分形维数表现为先快速上升后平稳上升再下降,分形维数在中段出现“弱平台阶段”,而孔隙率则一直上升,没有出现“弱平台阶段”,导致二者差异增大。若以自身定义为参量对两种方法进行对比研究,结果发现:孔隙率方法着重表征孔隙数量变化,即试件孔隙面积与总面积的百分比,可定量解释老化前后NEPE推进剂在拉伸过程中的细观损伤程度^[9];而分形维数方法更擅于描述孔隙几何形态细节变化与表面粗糙度,该参数值越大,表明推进剂细观结构的几何分布越复杂。此外,老化、表观形貌差异等因素均会影响孔隙率与分形维数表征的差异性。由此可见,孔隙率法和分形维数法均适于老化前后推进剂表征研究,孔隙率法用于统计孔穴、裂缝面积占比,评估材料结构完整性,而分形维数法则适用于评估材料表观粗糙复杂度。

3 结论

通过场发射扫描电子显微镜对不同老化时间NEPE推进剂进行原位拉伸实验,结合数字图像处理技术并运用分形维数和孔隙率对推进剂进行表征,得出以下结论:

(1)分形维数可作为表征老化推进剂拉伸过程中表观形貌变化的指标,其强调表面粗糙度与复杂度的演变特征。研究表明:在伸长率约小于20%阶段,老化前后推进剂分形维数随伸长率增长较快。随后,由于老化时间不同,分形维数随伸长率呈不规则上升或下降;在不同老化周期试件中,分形维数演变规律存在差异,且随着老化时间延长,伸长率在20%~60%阶段分形维数与伸长率呈现更强的线性相关性。

(2)孔隙率与分形维数对老化前后推进剂拉伸过程表征存在一定差异,老化后两种表征结果差异显著。总的来说,孔隙率随伸长率先呈现缓增趋势,随后变化趋势取决于是否老化,出现加速上升或持续缓增,断裂后开始下降;分形维数表现为先快速增大后增速趋缓,

随后因老化呈现不同趋势。孔隙率侧重孔隙数量占比的量化分析,分形维数强调表观几何的粗糙度与复杂度,二者虽均可表征老化前后推进剂拉伸过程中的变化,但研究重点有所不同。

参考文献:

- [1] 李敬明,郑雪,李伟,等. NEPE推进剂拉伸破坏过程实验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2):241-243.
LI Jing-ming, ZHENG Xue, LI Wei, et al. Experimental study on tensile damage process of NEPE propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 241-243.
- [2] 郭翔. NEPE推进剂/衬层界面粘结、破坏机理与力学性能调控技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
GUO Xiang. Investigation on bonding, failure mechanism and mechanical performance tuning of interfaces between NEPE solid propellant and liner[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [3] 侯宇菲,许进升,古勇军,等. 基于内聚力法则的高能硝酸酯增塑聚醚推进剂开裂过程细观模型[J]. 兵工学报, 2020, 41(11): 2206-2215.
HOU Yu-fei, XU Jin-sheng, GU Yong-jun, et al. Mesoscopic model of cracking process of high-energy nitrate ester plasticized polyether propellant based on cohesive zone law[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(11): 2206-2215.
- [4] 庞爱民,池旭辉,尹华丽. NEPE推进剂/衬层界面研究进展[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2):181-189+202.
PANG Ai-ming, CHI Xu-hui, YIN Hua-li. Recent advances on research of adhesive interfaces between NEPE propellants and HTPB liner[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(2): 181-189+202.
- [5] MILEKHIN Y M, KOPTILOV A A, SHISHOV N I, et al. Evaporation of plasticizer from NEPE type propellant [J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, 91(5): 802-812
- [6] 闫志鸿,陶涛,隋欣,等. NEPE推进剂老化过程中抗拉强度的表征[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3):356-360.
YAN Zhi-Hong, TAO Tao, SUI Xin, et al. Characterization of tensile strength of NEPE propellant during aging [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3):356-360.
- [7] 李世奇,强洪夫,陈铁铸,等. 单轴拉伸下NEPE固体推进剂细观结构演化行为研究[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 175-182.
LI Shi-qi, QIANG Hong-fu, CHEN Tie-zhu, et al. Mesostructure evolution behavior of NEPE solid propellant under uniaxial tension[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2): 175-182.
- [8] 尹玉亮,李培珍,康与云,等. 分形理论的发展概况及研究现状[J]. 科技信息(科学教研), 2007, (15):172+170.
YIN Yu-liang, LI Pei-zhen, KANG Yu-yun, et al. Development overview and research status of fractal theory[J]. *Science and Technology Information (Scientific Research and Teaching)*, 2007, (15): 172+170.
- [9] 陈煜,刘云飞,谭惠民. NEPE推进剂的细观力学性能研究[J]. 火炸药学报, 2008, (1): 56-59.
CHEN Yu, LIU Yun-fei, TAN Hui-min, et al. Study on the micro-mechanics of the NEPE solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & opellants*, 2008, (1): 56-59.
- [10] 复合固体推进剂高温加速老化试验方法:QJ 2328A-2005[S], 2005.

- Test Method for High-Temperature Accelerated Aging of Composite Solid Propellant: QJ 2328A-2005[S], 2005.
- [11] 复合固体推进剂单向拉伸试验方法:QJ 924-1985[S], 1985. Test Method for Uniaxial Tension of Composite Solid Propellant: QJ 924-1985[S], 1985.
- [12] 杨秋秋, 徐胜良, 蔡如琳, 等. 基于数字图像处理的复合固体推进剂微观损伤行为研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(1): 83-91. YANG Qiu-qiu, Xu Sheng-liang, Cai Ru-lin, et al. Mesoscopic damage behavior of composite solid propellants based on digital image processing technology[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(1): 83-91.
- [13] 杨秋秋, 徐胜良, 强福智, 等. 固体推进剂 SEM 图像分形维数研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(1): 63-67. YANG Qiu-qiu, XU Sheng-liang, QIANG Fu-zhi, et al. Study on fractal dimension of SEM images of solid propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2021, 19(1): 63-67.
- [14] ZHOU K, SHEN Z, Fan Z, et al. Shear mechanical properties prediction method and simulation calculation model of aging NEPE propellant adhesive interface[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2025, 50(6), e12052.
- [15] 霍文龙, 谢丽娜, 孙雪莹, 等. 固体推进剂老化过程影响因素及化学反应机理研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 64-76. HUO Wen-long, XIE Li-na, SUN Xue-ying, et al. Affecting factors and chemical reaction mechanism of composite solid propellants during the aging process [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(10): 67-76.
- [16] 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.
- [17] 刘新国, 王哲君, 韩永恒, 等. 拉伸加载下老化复合固体推进剂的损伤演化定量分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 1-8. LIU Xin-guo, WANG Zhe-jun, HAN Yong-heng, et al. Quantitative characterization of damage evolution under tensile loading [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(4): 1-8.
- [18] 李世奇, 王广, 强洪夫, 等. HTPB 复合固体推进剂微观结构微 CT 试验研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 387-393. LI Shi-qi, WANG Guang, QIANG Hong-fu, et al. Micro-CT experimental study on the mesostructure of HTPB composite solid propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3): 387-393.
- [19] RUI S, BOYANG S, XINHUI L, et al. A mesoscopic damage model of solid propellants under thermo-mechanical coupling loads[J]. *Polymer Testing*, 2019, 79: 105927-105927.
- [20] LI T, XU J, HAN J, et al. Effect of microstructure on micro-mechanical properties of composite solid propellant [J]. *Micromachines*, 2021, 12(11): 1378.

Characterization and Analysis of Tensile Damage Evolution in Aged NEPE Propellant Based on Fractal Dimension

ZHANG Tao¹, JI Yong-chao², LI Zhuo¹, CHEN Jia-xing³, LIU Xiao-han⁴, TIAN Li-min¹, LIANG Wen-long¹, MO Shi-liang¹

(1. College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. The 41st Research Institute of the Sixth Research Academy, China Aerospace Science and Industry Corporation, Hohhot 010000, China; 4. The 46st Research Institute of the Sixth Research Academy, China Aerospace Science and Industry Corporation, Hohhot 010000, China)

Abstract: To quantitatively investigate the evolution of surface mesoscopic damage in nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant during tension before and after aging, thermal accelerated aging tests were conducted with different aging days (0, 7 d, 40 d, 80 d). An in-situ tensile machine combined with field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) was employed for in-situ tensile testing, after which the captured images underwent digital processing. The fractal dimension was applied to quantitatively characterize and analyze the evolution of mesoscopic damage in the propellant at different aging stages. The differences between porosity method and fractal dimension method in characterizing mesoscopic damage before and after aging were studied. Results indicate that fractal dimension successfully captures the apparent damage evolution of NEPE propellant over different aging stages. During tension, for elongation below 20%, the fractal dimension rises relatively quickly with elongation. In the 20%-60% elongation range, the fractal dimension still increase with elongation, though at a reduced rate. Moreover, longer aging times were found to enhance the linear correlation between fractal dimension and elongation in this stage. Beyond 60% elongation, the fractal dimension shows irregular variation with elongation for all aging stages. Differences emerged between the porosity method and the fractal dimension method when characterizing the tensile process, especially after aging. While the porosity method mainly measures the area fraction of pores, the fractal dimension method characterizes the roughness and complexity of the surface morphology.

Key words: nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant; aging; mesoscopic damage; fractal dimension; in-situ tensile

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025163

(责编:姜梅)