

专题——装药结构的损伤、安全性和寿命评估

拉伸加载下老化复合固体推进剂的 损伤演化定量分析

刘新国¹, 王哲君^{1*}, 韩永恒², 陈家兴³

(1.火箭军工程大学, 西安 710025; 2.海军装备部驻北京地区军事代表局, 北京 100071;

3.内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010)

摘要: **目的** 定量分析老化对拉伸加载下复合固体推进剂微观损伤演化的影响规律。**方法** 开展不同老化时间(0、32、74、98 d)下三组元端羟基聚丁二烯(HTPB)复合固体推进剂的热加速老化试验, 以及老化后推进剂的微型哑铃形试验件在不同拉伸应变水平(0、5%、10%、20%、40%、50%)下的微CT扫描观测试验, 并对扫描重构图像进行定量分析, 获得老化对推进剂微观损伤演化的影响规律。**结果** 随拉伸应变增加, 老化前后推进剂微CT图像的灰度均方差、平均孔隙率和图像的分形维数均呈非线性增加趋势, 图像的灰度均值呈非线性减小趋势。在较低应变水平(<10%)下, 上述参数受老化时间的影响不显著, 但随拉伸应变增加(≥10%)和老化时间增长, 灰度均方差、平均孔隙率、孔隙率增量和分形维数的数值整体增高, 而灰度均值随老化时间的增长而降低, 且不同老化时间下, 分形维数与平均孔隙率之间存在正线性关系。**结论** 重构得到微CT图像的灰度均值、平均孔隙率和分形维数可作为表征参数, 用于定量分析老化复合固体推进剂在拉伸载荷下的微观损伤和损伤的动态演化规律, 推进剂的初始损伤和小应变下的损伤程度受老化的影响较弱, 而老化时间对推进剂微观损伤的影响在较高应变水平下更加显著。

关键词: 复合固体推进剂; 老化; 拉伸加载; 损伤演化; 定量分析; 微CT

中图分类号: V512

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)04-0001-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.001

Quantitative Characterization of Damage Evolution for Aged Composite Solid Propellant under Tensile Loading

LIU Xinguo¹, WANG Zhejun^{1*}, HAN Yongheng², CHEN Jiaying³

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. Military Representative Bureau of Naval Armament Department in Beijing Region, Beijing 100071, China; Inner Mongolia Institute of Dynamical Machinery, Hohhot 010010, China)

ABSTRACT: The work aims to quantitatively analyze the effect of aging on the microscopic damage evolution of composite solid propellant under tensile loading. Thermal accelerated aging tests on three component hydroxyterminated polybutadiene (HTPB) composite solid propellants at different aging times (0, 32, 74, and 98 days) and micro-CT scanning observation tests on

收稿日期: 2024-03-28; 修订日期: 2024-04-17

Received: 2024-03-28; Revised: 2024-04-17

基金项目: 陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20190504)

Fund: Youth Talent Promotion Plan of Shaanxi University Science and Technology Association (20190504)

引文格式: 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 Xinguo, WANG Zhejun, HAN Yongheng, et al. Quantitative Characterization of Damage Evolution for Aged Composite Solid Propellant under Tensile Loading[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 1-8.

*通信作者(Corresponding author)

small dumbbell shaped sample of aged propellant at different tensile strain levels (0, 5%, 10%, 20%, 40% and 50%) were conducted. Then, the scanning reconstructed images were quantitatively analyzed to obtain the effect of aging on the microscopic damage evolution law of the propellant. As the tensile strain increased, all the gray level mean square deviation, average porosity and fractal dimension of the micro-CT images for the unaged and aged propellant showed a non-linear increasing trend, while the gray level mean value of the images showed a non-linear decreasing trend. At lower strain levels ($<10\%$), the above parameters were not significantly affected by aging time, but at the higher tensile strain ($\geq 10\%$) and longer aging time, all the values of the gray level mean square deviation, average porosity and fractal dimension increased, while the gray level mean value decreased with aging time. Moreover, there was a positive linear relationship between fractal dimension and average porosity at different aging times. The gray level mean value, average porosity and fractal dimension of the reconstructed micro-CT images can be selected as the characterization parameter to quantitatively analyze the micro damage and dynamic evolution of aged composite solid propellant under tensile load. The initial damage and damage degree of HTPB propellant under small strain are weakly affected by aging, while the effect of aging time on the micro damage of the propellant is more significant at higher strain levels.

KEY WORDS: composite solid propellant; aging; tensile loading; damage evolution; quantitative analysis; micro-CT

目前,某发动机中应用最为广泛的复合固体推进剂属于典型的颗粒增强复合含能材料,其宏观力学性能的变化在很大程度上取决于细观结构损伤的发生和演化^[1]。该发动机在点火前,通常要经历较长的贮存周期,固体推进剂在该周期内会发生老化现象^[2]。因此,研究不同老化时间后复合固体推进剂的初始损伤,以及在典型载荷条件下细观结构的动态损伤演化,对于有效评估 SRM 在不同贮存期后的使用可靠性和安全性具有重要意义。

在过去几十年里,国内外研究者通过热加速老化试验方法、动态力学分析法(DMA)、差示扫描量热法(DSC)和拉伸试验等手段对固体推进剂的老化性能进行了大量研究^[3-7],揭示了老化对推进剂宏观性能(如模量、玻璃化转变温度、拉伸强度和伸长率)的影响规律,建立了描述性能参数变化的老化模型,并分析了老化过程中可能发生的化学和物理机制,但有关老化后固体推进剂细观损伤的研究,主要集中在扫描电镜(SEM)对力学性能试验后老化固体推进剂的断面形貌进行定性分析方面。基于准静态拉伸断面 SEM 图像, Ide 等^[8]、Wang 等^[9]指出,老化对固体推进剂的细观损伤具有显著影响,损伤机制不仅包括固体填充颗粒与基体之间黏接界面发生的“脱湿”现象,还包括部分填充颗粒发生的断裂,与未老化推进剂的细观损伤存在明显区别。Cerri 等^[10]发现,当在 65~85 °C、RH<10%条件下进行热加速老化实验时,二硝酰胺铵(ADN)推进剂细观结构中,固体填充颗粒表面出现的条纹数量和尺寸随老化时间的延长而增加,且颗粒显示出凹槽。从预应变为 3%、6%、9%的端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂在 328.15~348.15 K 条件下不同老化时间后的室温准静态单轴拉伸(100 mm/min)断面形貌来看,HTPB 推进剂的界面结合性能主要受老化温度的影响,低于 9%的预应变对黏接界面损伤没有明显影响^[11-12]。随后, Wang 等^[13]

通过观察推进剂试验件在 343 K 下加速老化 90 d 后的室温准静态拉伸(100 mm/min)断面 SEM 照片,进一步表征了具有较高预应变(12%、15%)的老化 HTPB 推进剂的细观损伤。结果表明,当预应变为 12%时,AP 颗粒之间出现大量孔隙。此外,随预应变增加,孔隙的数量进一步增大。为突破上述定性分析法在研究老化后固体推进剂细观损伤程度量化方面存在的局限,刘新国等^[14]基于获得的拉伸(应变率为 0.40、4.00、14.29、42.86 s⁻¹)断面 SEM 图像和分形理论及算法的研究手段,定量揭示了低温(-40~25 °C)和老化(0、32、74、98 d)耦合作用对推进剂细观损伤的影响规律。综上所述,基于定性化方法获得的结果,为研究者认识老化对复合固体推进剂细观损伤机理的影响,以及评判不同因素的影响效果提供了重要支撑,但量化研究方面的匮乏,尤其是针对老化前后初始损伤的表征和定量计算,以及老化对加载过程中损伤程度影响的定量计算和分析,严重制约了研究者充分认识和掌握老化对复合固体推进剂细观损伤程度的影响规律。

本文对 HTPB 复合固体推进剂进行了热加速老化试验,开展了不同拉伸应变水平下的微 CT 扫描测试,基于推进剂细观结构微 CT 重构图像和统计分析法,利用图像灰度值、孔隙率和图像分形维数作为参量,定量分析老化对 HTPB 推进剂初始损伤和动态损伤演化的影响规律,为量化评估 SRM 在不同贮存期后的使用可靠性和安全性提供参考。

1 试验

1.1 材料

本文选用三组元 HTPB 复合固体推进剂作为研究对象,其固体颗粒(高氯酸铵(AP)/铝粉(Al))的填充质量分数为 88%,AP 颗粒的粒径分别位于

105~150 μm 、180~280 μm 、280~400 μm 、<30 μm , Al 颗粒的平均粒径为 20 μm 。其他组分(如基体、增塑剂(癸二酸二丙酯, DOS)、固化剂(甲苯-2,4-二异氰酸酯, 2,4-TDI)和键合剂(三氧化磷(2-甲基氮丙啶), MAPO)等)的质量分数为 12%。

1.2 热加速老化试验

根据 QJ 2328A—2005, 将同一锅浇注的 HTPB 推进剂加工成 120 mm×130 mm×30 mm 的试验件, 然后在防爆油浴烘箱内开展 70 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的热加速老化试验。根据复合固体推进剂的常温自然贮存时间和热加速老化时间之间的对应关系, 本文按照设定的热老化时间间隔(0、32、74、98 d)取样, 并放置于有干燥剂的玻璃罐子里, 自然冷却至室温(24 h)。

1.3 基于微 CT 的细观损伤观测试验

根据 GJB 770B—2005 中方法 413.1 和李世奇等^[15]的研究结果, 将不同热老化时间间隔取样后并冷却至室温的试验件(120 mm×130 mm×30 mm)制成与标

准哑铃形试验件应力、应变状态较为接近的微型哑铃形试验件(如图 1a 所示), 其长、宽、厚方向的尺寸分别为 20、6、3 mm, 标距段长度为 7 mm。然后, 将微型试验件安装于新一代桌面微 CT(型号 SkyScan 1172, 最高分辨率为 0.5 μm)的腔体旋转台上(如图 1b 所示), 并利用自带加载机构对试验件进行拉伸, 拉伸速度为 0.2 mm/min。原位拉伸过程中, 在特定应变处(0、5%、10%、20%、40%、50%)对试验件进行逐层环向扫描时的参数: 腔内温度为 27 $^{\circ}\text{C}$, 工作电压为 75 kV, 工作电流为 133 mA, 分辨率为 4 000×2 672, 曝光时间为 1 800 ms, 旋转 180 $^{\circ}$, 旋转步长为 0.25 $^{\circ}$ 。最后, 利用 Feldkamp 锥形光束运算法则, 将不同角度获取的试验件投影图像进行重构, 得到一系列二维界面图像和微 CT 灰度图像, 即得到了不同加载应变下推进剂的细观结构变化图像, 具体工作原理详见文献[16]。为避免小型哑铃形试验件加工过程中出现的人为损伤, 影响后续对于损伤程度的统计分析, 选取远离试验件表面的内部区域作为分析的有效区域。

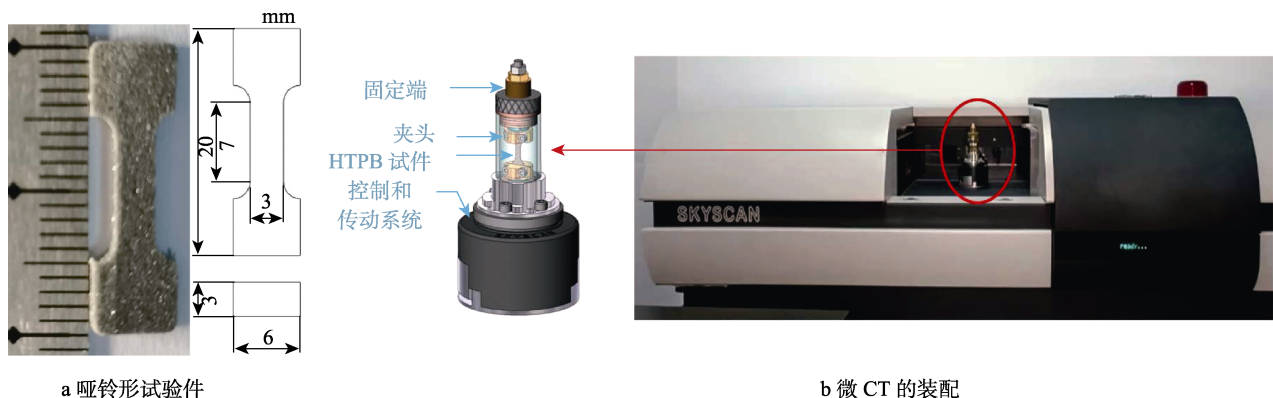


图 1 小型 HTPB 推进剂试验件及与微 CT 的装配图^[15]

Fig.1 Assemble drawing of small HTPB propellant sample with miro-CT^[15]: a) dumbbell-shaped sample; b) assembly of micro-CT

2 结果及分析

损伤的发生和演化, 会导致固体推进剂的细观结构发生改变。因此, 利用图像处理和统计手段对获得的微 CT 重构图像进行分析, 即可定量得到拉伸加载下推进剂的细观损伤程度及演化规律。

2.1 基于灰度值的细观损伤演化定量分析

材料微 CT 扫描重构图像的灰度值与其密度呈近似线性关系^[17-18]。因此, 当材料发生损伤时, 其图像灰度值会随密度的降低而减小。此外, 利用图像灰度值的均方差还可以分析材料在不同损伤阶段内部细观结构均匀性的变化规律, 其数值随均匀性的下降而不断增大。基于此, 选取灰度均值 $\bar{f}$ 及其均方差 S 定量分析拉伸加载下老化前后 HTPB 推进剂的

细观损伤演化情况。上述 2 个参量的计算方法见时(1)、(2)^[19]。

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{f(i, j)}{M \times N} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - \bar{f}]^2 \quad (2)$$

式中: $f(i, j)$ 是空间坐标 (i, j) 处像素大小为 $M \times N$ 的微 CT 图像灰度值的二维阵列函数。

利用式(1)和(2), 首先计算得到同一截面层微 CT 图像的灰度均值 $\bar{f}$ 和均方差 S , 然后通过对不同截面层的数值进行平均, 即可得到整个推进剂试验件在不同加载条件下的整体灰度均值 $\bar{f}$ 和均方差 S 。拉伸加载过程中, HTPB 推进剂老化前后的微 CT 图像灰度值曲线如图 2 所述。

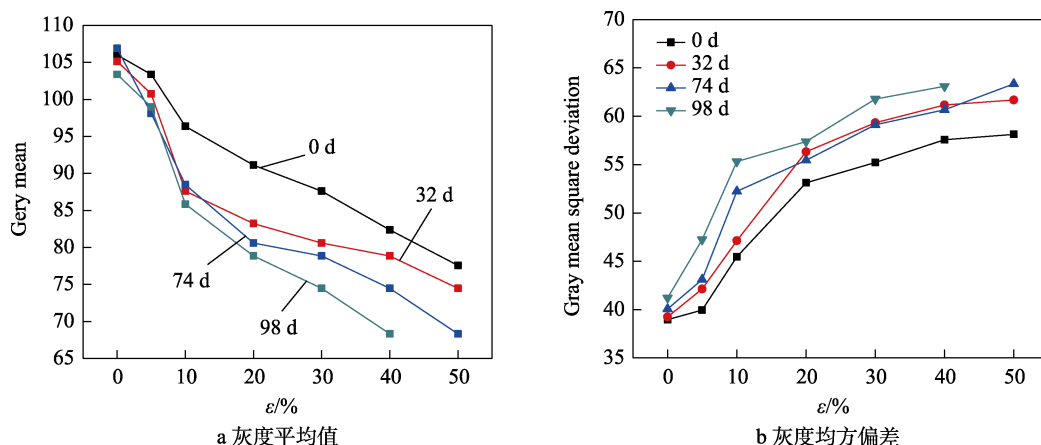


图2 拉伸加载过程中老化前后 HTPB 推进剂的微 CT 图像灰度值曲线
Fig.2 Curves of gray value of micro-CT images for unaged and aged HTPB propellant during tensile loading:
a) gray level mean value; b) gray level mean square deviation

由图 2 可知, 拉伸加载前, 热老化时间对灰度均值 $\bar{f}$ 和均方差 S 的影响较小, 即热老化不会显著改变 HTPB 推进剂的初始细观结构。当预应变为 0 时, 热老化不会导致 HTPB 推进剂更严重的初始损伤, 这与 Zhou 等^[11]的研究结果一致。此外, 随加载后应变的不断增加, HTPB 推进剂老化前后的微 CT 图像的灰度均值 $\bar{f}$ 均持续减小, 而均方差 S 不断增加, 而且上述参数的减小速率和增大速率都是先增大、后减小, 最大减小速率或增大速率均出现在 10% 应变水平处。这与准静态拉伸加载下 HTPB 推进剂细观结构发生“脱湿”损伤的特性保持一致, 即临界损伤阈值通常处于 10% 附近^[15]。在低于该应变水平时, 由于所有固体填充颗粒仍被基体包裹, 微 CT 图像灰度值的变化主要源于拉伸载荷下的初始损伤扩展(微裂纹张开和空隙延长)。当拉伸应变增加到 10% 时, 由于固体填充颗粒与基体黏接界面的“脱湿”损伤现象开始发生, 在初始损伤传播和黏接界面损伤的耦合作用下, 灰度均值 $\bar{f}$ 的下降率和均方差 S 的上升率均变高。然而, 随应变持续增加, 占推进剂体积分数很大的固体填充颗粒的密度没有变化, 因此损伤演化对推进剂微 CT 图像灰度值的影响较小, 即灰度均值 $\bar{f}$ 的减小速率和均方差 S 的增大速率再次减小, 导致最大减小速率或增大速率均出现在 10% 应变水平处。

由图 2 还可以看出, 拉伸加载后, HTPB 推进剂老化前后的微 CT 图像的灰度均值 $\bar{f}$ 或均方差 S 存在显著差异, 灰度均值 $\bar{f}$ 随老化时间的增加而减小, 但均方差 S 则不断增大。老化 98 d 后, 上述 2 个参数在 40% 应变下的数值分别降低或增大至未老化时的约 82.97% 和 1.1 倍, 表明热老化对 HTPB 推进剂加载后的细观损伤演化具有更为显著的影响。同时, 损伤程度总体上随老化时间的延长而不断增大, 且推进剂细观结构的非均匀性也在不断增大。

2.2 基于孔隙率的细观损伤演化定量分析

当拉伸应变超过临界数值时, 固体推进剂细观结构中的固体填充颗粒与基体之间的黏接界面发生分离, 导致新孔隙出现, 并发生扩展。因此, 可以从微 CT 重构图像中提取上述孔隙, 并进一步选择其体积比(孔隙率)作为参量, 从而定量分析老化前后 HTPB 推进剂在拉伸载荷下的细观损伤演化规律。

密度越大的物质, 其对应的 CT 图像灰度值就越大, 而且对 X 射线的衰减程度也越大^[15]。基于此, 可通过设置适当的分割阈值, 利用微 CT 自带的图像分析软件将孔隙从重构图像中提取出来。其中, 分割阈值主要基于三组元 HTPB 推进剂内部组分的灰度直方图(如图 3 所示)和文献[20-21]进行确定。具体步骤: 首先, 选择小于 50 (第一高斯峰) 的值作为初始阈值, 提取重构微 CT 图像中不同截面层的孔隙; 然后, 通过将提取结果(处理后)与不同截面层的微 CT 图像(处理前)中的结果进行比较, 尤其是典型

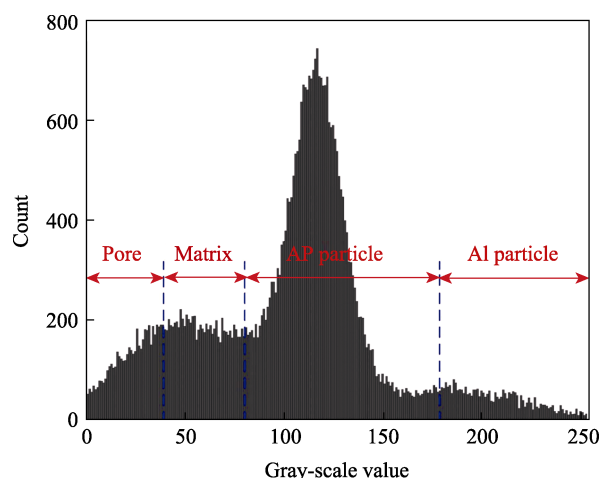


图3 识别 HTPB 推进剂不同组分的灰度值阈值
Fig.3 Gray-scale threshold value for identifying different components of HTPB propellant

特征区域的比较, 以分析孔隙的分布。如所有孔隙都被完全分割和提取, 则该初始阈值是孔隙的最终分割阈值; 反之, 在初始阈值附近连续进行调整, 直到孔隙被完全分割和提取, 则此时设置的数值为孔隙的最终分割阈值。采用上述方法, 未老化 HTPB 推进剂在加载前典型截面层的提取孔隙分布情况如图 4 所示。基于提取的孔隙, 将其微 CT 图像中的体积与推进剂试验件体积的比率定义为孔隙率。根据上述程序和数学统计, 老化前后 HTPB 推进剂的平均孔隙率及其增量 ($(P_{\text{aged}} - P_{\text{unaged}}) / P_{\text{unaged}} \times 100\%$) 与应变的关系如图 5 所示。

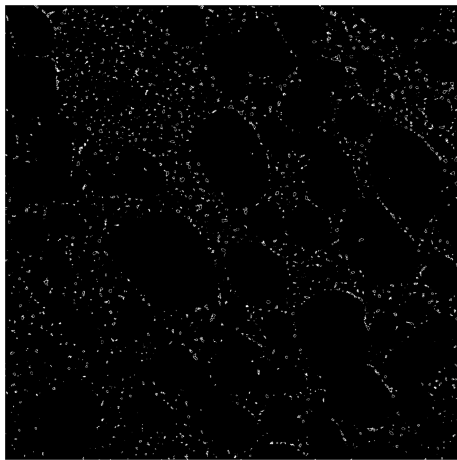
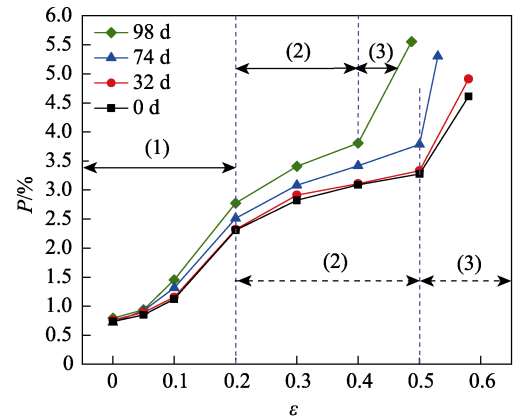


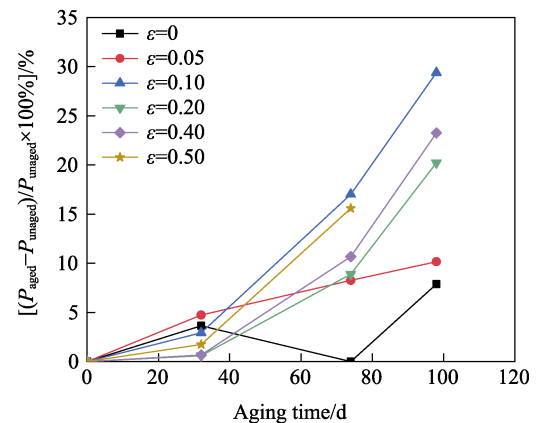
图 4 加载前未老化 HTPB 推进剂典型截面层中的孔隙分布

Fig.4 Distribution of the extracted pores for unaged HTPB propellant in a typical layer before loading

由图 5a 可知, 老化前后 HTPB 推进剂的平均孔隙率-应变曲线特性保持一致, 均呈非线性增加趋势, 且可划分为 3 个区域, 依次为失效前的初始增加区域 (<20%应变)、近似连续增加区域 (20%~40%或 20%~50%应变) 和最终快速增加区域 (>40%或 >50%应变)。在第 1 个区域, 应变水平为 5%时, 平均孔隙率增量总体上小于较大应变处的平均孔隙率增量, 且平均孔隙率增量的最大值出现在 10%应变水平处, 如图 5b 所示。上述现象与 HTPB 推进剂细观结构发生“脱湿”现象的特性保持一致, 即小于 10%应变时, 推进剂细观结构的损伤演化可能是由于初始孔隙在拉伸载荷下的膨胀 (微裂纹张开和孔隙延长), 黏接界面损伤较小; 而超过 10%应变后, 黏接界面损伤开始发生, 导致新孔隙的出现。在初始孔隙膨胀和新孔隙形成的耦合作用下, 孔隙率及其增加速率变得更高, 最大的增长率出现在 10%应变水平处。在第 2 个区域, HTPB 推进剂的黏接界面损伤稳定传播, 并且存在更多的孔隙。因此, 当应变增加时, 平均孔隙率仍呈上升趋势, 但增加速率大致恒定。在第 3 个区域, 超过 40%或 50%的应变时, 由界面损伤引起的大量微裂纹和孔隙迅速扩展, 并迅速收敛, 逐渐导致宏



a 平均孔隙率



b 相对增量

图 5 不同拉伸应变下老化前后 HTPB 推进剂的平均孔隙率及其相对增量

Fig.5 Average porosity and its relative increment for unaged and aged HTPB propellant with strain in tension: a) average porosity; b) relative increment

观裂纹的形成和生长, 最终导致推进剂的宏观失效破坏。由于上述损伤演化急剧发生, 导致平均孔隙率在短时间内迅速增加, 且孔隙率增量仅低于 10%应变水平下的情况。

由图 5a 可知, 加载前, 老化前后的推进剂中均存在一定比例的孔隙, 约为 0.75%。这些不均匀分布的孔隙可以定义为 HTPB 推进剂的初始损伤。同时, 在应变低于 5%时, 老化前后推进剂的平均孔隙率差异不明显, 这表明热老化对该阶段 HTPB 推进剂的损伤和损伤演化没有显著影响。但加载后, 老化对 HTPB 推进剂细观结构中平均孔隙率的影响逐渐变得显著, 尤其是在高于 5%的应变水平下, 如图 5b 所示。随着老化时间的增加, 平均孔隙率及其增量均不断增大, 这是由于在拉伸载荷下, 老化时间增加会导致固体推进剂内部的损伤更严重。因此, 推进剂试验件在老化 98 d 后, 拉伸断裂发生在 40%应变水平处, 远低于老化较短时间后的断裂应变水平 (约 50%)。此外, 由图 5a 可知, 老化时间小于 32 d 时, 推进剂断裂开始的临界平均孔隙率阈值约为 3.3%, 但随老化时间增加, 该临界阈值增加至约 3.8%。

2.3 基于分形的细观损伤演化定量分析

Mandelbrot 最初提出的分形理论可以为表征材料细观结构的复杂性和不均匀性等特殊性质提供一种科学的方法^[22]。固体推进剂细观结构中的孔隙和微裂纹通常大小不均匀,在空间上随机分布,并且往往遵循分形比例律。因此,分形方法可以用来分析固体推进剂在不同载荷条件下的损伤程度和损伤演化。然而,这种方法的主要工具是分形维数 F_D ,因为它显示了关于分形对象的复杂性和不规则性的有用信息。目前,国内外研究者已经提出了多种方法来定义和计算图像的分形维数,如 Hausdorff 维数和填充维数等^[23-24]。在这些方法中, Pontrjagin 和 Schnirelman 首次提出的计盒维数法因其简单性和高

可计算性的优势而被广泛地使用^[25]。因此,本研究将该方法与微 CT 图像相结合,以分析 HTPB 推进剂在不同加载应变水平下的损伤。根据计盒维数法的基本理论^[14],使用码尺 k 和覆盖所要分析区域的总盒子数 $N(k)$ 之间关系的最佳拟合线的斜率定义为微 CT 图像的分形维数 F_D ,如式(3)所示。基于上述思想和在 MATLAB 软件中编译运行相关计算程序,获得老化前后 HTPB 推进剂在不同加载应变水平下的微 CT 图像分形维数 F_D ,如图 6a 所示,其与相应应变水平下的平均孔隙率的对应关系如图 6b 所示。

$$F_D = -\lim_{k \rightarrow 0} \frac{\lg N(k)}{\lg(1/k)} \quad (3)$$

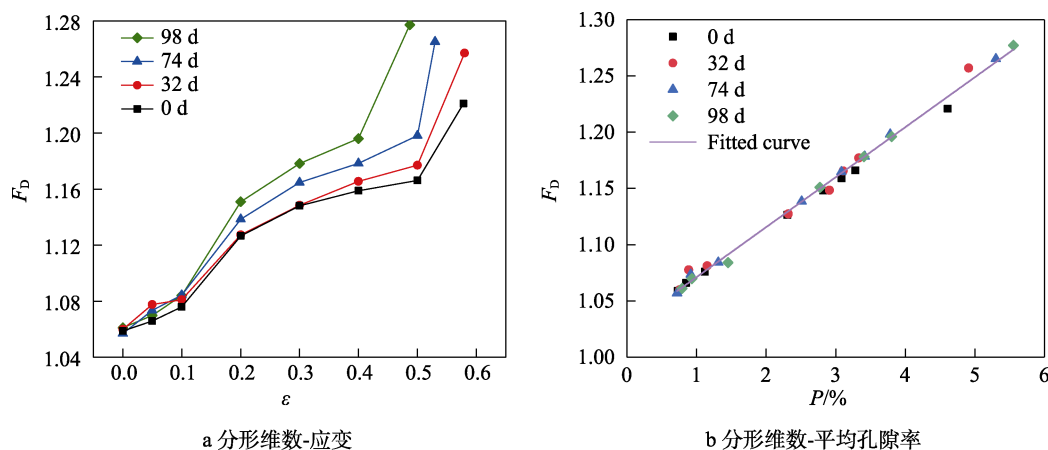


图6 拉伸加载过程中老化前后 HTPB 推进剂的微 CT 图像的分形维数

Fig.6 Fractal dimension of micro-CT images for unaged and aged HTPB propellant during tensile loading:
a) fractal dimension-strain; b) fractal dimension-average porosity

由图 6a 可知,对于老化和未老化的 HTPB 推进剂,其分形维数均随应变的增加而连续增大,而且该参数总体上也随老化时间的延长而增大。老化 98 d 后,40%应变(失效前)下的分形维数上升到加载前相应数值的 1.13 倍。上述变化趋势与前述灰度均值的均方差(见图 2b)和平均孔隙率(见图 5a)的变化规律一致。其次,由图 6b 可知,老化前后 HTPB 推进剂的微 CT 图像的分形维数与孔隙率呈正相关,与文献[26]的结果一致。此外,不同老化时间下,上述 2 个参数之间的关系均呈近似线性关系,具有相同的斜率 0.044。如上所述,平均孔隙率可以定量解释老化前后 HTPB 推进剂在不同拉伸应变水平下的初始损伤和细观结构的损伤程度,平均孔隙率越大,推进剂的损伤越严重。分形维数通常是表征材料细观结构复杂性和不均匀性的重要参数,该参数越大,表明老化前后 HTPB 推进剂细观结构的分布越复杂。因此,该参数与平均孔隙率之间的正线性关系表明,在较高拉伸应变水平或较长老化时间下,HTPB 推进剂的损伤程度和细观结构几何空间分布的复杂性都

会增加,即黏接界面“脱湿”损伤导致老化前后 HTPB 推进剂细观结构几何形状(尤其是孔隙几何形状)的空间分布更复杂,在试验条件下导致平均孔隙率变化的原因也可以用来解释分形维数的变化。同时,分形维数与平均孔隙率之间的正线性关系也表明它们的值可以相互预测。

综上所述,微 CT 重构图像的分形维数不仅可以直接表征 HTPB 推进剂在不同拉伸应变水平和老化时间下细观结构几何(特别是孔隙几何)空间分布的复杂性,还可以间接反映推进剂细观结构的损伤和损伤演化情况。因此,与平均孔隙率等其他参量相比,分形维数代表了更多关于固体推进剂在各种载荷条件下细观结构的信息。

3 结论

1) 在较低的拉伸应变水平($<10\%$)下,老化对 HTPB 推进剂微 CT 重构图像的灰度均值、灰度均方差、平均孔隙率和分形维数的影响较弱,即老化对推

进剂的初始损伤和小应变下损伤程度的影响并不显著。以平均孔隙率为表征参量时,推进剂的初始损伤约为0.75%。

2) 随拉伸应变增加,老化前后推进剂微CT重构图像的灰度均方差、平均孔隙率、孔隙率增量和分形维数呈非线性增加趋势,而灰度均值呈非线性下降趋势,最大增大速率或减小速率均出现在10%应变水平处,且平均孔隙率-应变曲线呈现三阶段特性。在较大应变处,上述参量受到老化时间的显著影响。随老化时间的增长,灰度均方差、平均孔隙率、孔隙率增量和分形维数逐渐增大,而灰度均值逐渐减小。

3) 不同老化时间下,HTPB推进剂微CT图像的分形维数与平均孔隙率之间存在正线性关系,即随着拉伸应变水平和老化时间的增加,推进剂的损伤程度和细观结构几何(尤其是孔隙几何)空间分布的复杂性都增大。

4) 微CT重构图像的灰度均值、灰度均方差、平均孔隙率和分形维数随拉伸应变和老化时间的变化规律与准静态单轴拉伸下HTPB推进剂的细观损伤程度和损伤演化密切相关,均可选为推进剂在拉伸载荷下不同老化时间时进行损伤定量分析的代表参数。相较以往的定性分析,基于定量研究的方法更有助于全面了解老化对HTPB推进剂损伤特性和力学行为的影响规律。因此,基于上述表征参数的变化曲线,可建立相应条件下推进剂的损伤演化函数,进而获得用于经历不同贮存周期后SRM药柱使用可靠性和安全性分析的含损伤非线性本构模型。

参考文献:

- [1] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 2-5.
HOU Lin-fa. Composite Solid Propellant[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994: 2-5.
- [2] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 415-416.
CHEN Ru-xun. Design and Research of Solid Rocket Motor (the first volume)[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1991: 415-416.
- [3] CERRI S, BOHN M A, MENKE K, et al. Aging of HTPB/Al/AP Rocket Propellant Formulations Investigated by DMA Measurements[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(2): 190-198.
- [4] 强洪夫, 王哲君, 王广, 等. 低温动态加载下三组元HTPB复合固体推进剂的失效判据[J]. 含能材料, 2019, 27(4): 274-281.
QIANG H F, WANG Z J, WANG G, et al. Failure Criteria of Three-Component HTPB Composite Solid Propellant at Low Temperature under Dynamic Loading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(4): 274-281.
- [5] ROCCO J A F F, LIMA J E S, FRUTUOSO A G, et al. Thermal Degradation of a Composite Solid Propellant Examined by DSC[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 75(2): 551-557.
- [6] SHEKHAR H. Studies on Stress-Strain Curves of Aged Composite Solid Rocket Propellants[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(2): 90-94.
- [7] ZHANG S C, XIAO L, QU W Z. Aging of Solid Propellants Investigated by Electromechanical Impedance Technique[J]. Journal of Propulsion and Power, 2021, 37(1): 68-76.
- [8] IDE K M, HO S Y, WILLIAMS D R G. Fracture Behaviour of Accelerated Aged Solid Rocket Propellants[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(17): 4209-4218.
- [9] WANG Z J, QIANG H F, WANG T J, et al. Tensile Behaviors of Thermal Aged HTPB Propellant at Low Temperatures under Dynamic Loading[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2020, 24(2): 141-159.
- [10] CERRI S, BOHN M A, MENKE K, et al. Aging of ADN Rocket Propellant Formulations with Desmophen®-Based Elastomer Binder[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(4): 526-537.
- [11] ZHOU D M, LIU X Y, SUI X, et al. Effect of Pre-Strain during Ageing on the Maximum Elongation of Composite Solid Propellants and Its Modelling[J]. Polymer Testing, 2016, 50: 200-207.
- [12] ZHOU D M, WU H X, LIU X Y, et al. Effect of Pre-Strain Aging on the Microdamage Properties of Composite Solid Propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(8): 1234-1242.
- [13] 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.
- [14] 刘新国, 刘佩进, 王哲君. 低温动态加载下老化HTPB推进剂细观损伤研究[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 72-77.
LIU X G, LIU P J, WANG Z J. Microscopic Damage of Aged HTPB Propellant at Low Temperatures under Dynamic Loading[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 72-77.
- [15] 李世奇, 强洪夫, 王广, 等. 单轴拉伸下HTPB推进剂细观损伤演化实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(9): 411-417.
LI S Q, QIANG H F, WANG G, et al. Experimental Study on Meso-Damage Evolution of HTPB Propellant under Uniaxial Tensile Load[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(9): 411-417.
- [16] 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 S Q, QIANG H F, CHEN T Z, et al. Mesostructure Evolution Behavior of NEPE Solid Propellant under

- Uniaxial Tension[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(2): 175-182.
- [17] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-280.
- YANG G S, XIE D Y, ZHANG C Q. The Quantitative Analysis of Distribution Regulation of Ct Values of Rock Damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279-280.
- [18] CHUNG S Y, KIM J S, STEPHAN D, et al. Overview of the Use of Micro-Computed Tomography (Micro-CT) to Investigate the Relation between the Material Characteristics and Properties of Cement-Based Materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116843.
- [19] 郑克洪. 基于 X-Ray CT 的煤矸颗粒细观结构及破损特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- ZHENG K H. Study on Mesostructure and Damage Characteristics for Coal and Gangue Particles Based on X-Ray CT[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [20] 李世奇, 王广, 强洪夫, 等. HTPB 复合固体推进剂细观结构微 CT 试验研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 387-393.
- LI S Q, WANG G, QIANG H F, 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.
- [21] 刘新国, 刘佩进, 强洪夫, 等. 基于微 CT 技术的丁羟推进剂脱湿定量表征方法研究[J]. 推进技术, 2019, 40(5): 1162-1168.
- LIU X G, LIU P J, QIANG H F, et al. Quantificational Method of Dewetting Damage of HTPB Propellant Based on Micro-CT Detection[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(5): 1162-1168.
- [22] XU S J, WENG Y J. A New Approach to Estimate Fractal Dimensions of Corrosion Images[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(16): 1942-1947.
- [23] FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ M, SÁNCHEZ-GRANERO M A. A New Fractal Dimension for Curves Based on Fractal Structures[J]. Topology and Its Applications, 2016, 203: 108-124.
- [24] FALCONER K. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications[J]. Biometrics, 1990, 46(3): 886.
- [25] SHI X H, PAN J N, HOU Q L, et al. Micrometer-Scale Fractures in Coal Related to Coal Rank Based on Micro-CT Scanning and Fractal Theory[J]. Fuel, 2018, 212: 162-172.
- [26] WU H, ZHOU Y F, YAO Y B, et al. Imaged Based Fractal Characterization of Micro-Fracture Structure in Coal[J]. Fuel, 2019, 239: 53-62.