

动载荷下固体推进剂损伤演化原位成像研究*

苑永祥¹, 刘岳勋¹, 赵蒙², 王龙³, 侯传涛³, 王焯军², 吴圣川¹

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 火箭军工程大学智剑实验室, 陕西 西安 710025;

3. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076)

摘要: 为研究硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 固体推进剂内部结构损伤演化行为, 采用同步辐射 X 射线三维成像和自主研发的原位压缩试验系统, 在 0.1 mm/s、1 mm/s 和 5 mm/s 加载速率下进行了宏观结构的原位可视化观测, 探究了推进剂宏观变形及其内部微裂纹的空间分布与传播模式。结果表明, 微裂纹主要形核并生长于填充颗粒与基体界面处, 细观孔隙的演化表现出率相关性。与拉伸加载下损伤持续生长不同, 压缩过程中孔隙形核、生长与闭合并存。尤其在高速压缩下, 推进剂产生“喇叭”状形貌且微裂纹沿四周分布, 表面宏观破坏由近表面颗粒与基体界面处微裂纹扩展传播所致。研究还发现, 微裂纹的传播与填充颗粒的空间位置相关, 在动态压缩载荷作用下微裂纹存在横向和轴向两种扩展模式; 基体竖直取向微裂纹易发生向水平取向微裂纹的转变, 从而导致裂纹闭合。

关键词: 固体推进剂; 原位动态压缩; 损伤率相关性; 内部损伤演化; 同步辐射三维成像

中图分类号: V512

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

In situ tomography on damage evolution of solid propellant under dynamic loading

YUAN Yongxiang¹, LIU Yuexun¹, ZHAO Meng², WANG Long³, HOU Chuantao³,
WANG Xuanjun², WU Shengchuan¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shanxi, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Structural damages of solid propellant will lead to combustion anomalies and affect ballistic performance. Based on the synchrotron radiation X-ray computed tomography technology and the *in-situ* mechanical loading test system, the macro-meso structures of Nitrate Ester Plasticized Polyether (NEPE) solid propellant at compressive rates of 0.1 mm/s, 1 mm/s and 5 mm/s were *in-situ* observed. The compressive process adopted an intermittent loading mode. Each time the preset displacement was reached, the loading was paused. This pause was crucial as it enabled the performance of scanning imaging. In this approach, the state of propellant was captured at specific phases in the compressive process. After the *in-situ* imaging experiment, the tomographic images of the samples underwent a series of processing steps. First, projection correction and phase recovery were performed using PITRE and PITRE_BM software. Subsequently, an image bit-depth conversion was carried out, resulting in the

*收稿日期: 2024-08-29; 修回日期: 2025-01-09;

基金项目: 国家自然科学基金 (52202082); 智剑实验室开放基金 (2024-ZJSYS-KF02-04); 火箭军工程大学青年基金 (2021QN-B014);

第一作者: 苑永祥 (1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: y896422289@163.com;

通信作者: 吴圣川 (1979-), 男, 博士, 研究员. E-mail: wusc@swjtu.edu.cn;

赵蒙 (1991-), 男, 博士, 讲师. E-mail: mengxjtu@163.com。

acquisition of 8-bit 2D grayscale slices. By means of the 3D reconstruction method, typical damages and evolutionary behaviors of solid propellant were analyzed. The macroscopic deformation of solid propellant as well as the distribution and propagation patterns of internal micro-cracks were explored. Results show that most of the micro-cracks nucleate and grow at the interface between filled particles and the matrix of solid propellant, and the evolution of meso-pores is rate-dependent. In contrast to the continuous growth of damage under tensile loading, the nucleation, growth and closure of pores occur simultaneously during compression. Under high-rate uniaxial compressive loading, solid propellant generates the characteristic trumpet-shaped deformation. The spatially distributed cracks mostly locate around solid propellant. Macroscopic damage of surfaces is caused by the propagation of micro-cracks between the near-surface particles and the matrix. The propagation of micro-cracks is related to the spatial location of filled particles in solid propellant. There are transversal and axial propagation modes of cracks under dynamic compressive loading. The transition from the vertically oriented crack to the horizontally oriented crack in matrix leads to closure of the crack.

Keywords: solid propellant; *in-situ* dynamic compression; damage rate-related behavior; internal damage evolution; synchrotron radiation 3D tomography

固体推进剂是一种典型的非均相颗粒增强复合材料，广泛用于先进航空航天装备动力系统^[1-4]。发动机运行中，推进剂内部颗粒或表面的孔隙和裂纹会显著影响其体积响应^[5-7]。填充颗粒从推进剂基体脱湿引起的结构损伤是材料表现出强非线性宏观响应的原因^[8]。因此，为评估固体推进剂药柱的力学结构完整性，必须深入理解不同加载下内部细观损伤的时空分布与拓扑结构。

目前国内外多数研究聚焦于固体推进剂在生产和服役中的损伤行为。例如，Rae 等^[9]基于光学显微镜 (Optical Microscope, OM) 研究了 PBX9501 炸药在压缩载荷下的微观形态与宏观变形。近年来，融合扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 的多模态试验技术可以更全面地研究高能填充材料的细观应变场及表面损伤演化过程与失效行为^[10-12]。但与传统破坏性 OM 和 SEM 局域表征方法难以获取材料内部信息不同，同步辐射 X 射线具有非破坏、强穿透、高分辨率等特点，已广泛用于先进材料结构的评价中^[13-15]。例如，Kerschen 等^[16]采用同步辐射 X 射线相衬成像研究了奥克托今 (HMX) 颗粒的冲击损伤行为。王龙等^[17]原位表征了 0.1 mm/s 拉伸速率下硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 固体推进剂的微细观结构及内部损伤演化行为；同时，魏晋芳等^[18]研究了准静态拉伸下端羟基聚丁二烯 (HTPB) 推进剂内部微细观结构变形和失效机理，分析了不同拉伸阶段孔隙率与宏观损伤之间的关系。这些研究，充分显示出高分辨 X 射线成像在可视化表征材料内部损伤行为的显著优势；若能原位实时动态观察固体推进剂在外部加载下内部微结构特征及演化，将其力学结构完整性评估提供重要实验数据支撑。

另外，可以开展基于原位三维损伤图像的微观结构演化高保真分析，将有助于量化推进剂内在的损伤机制。例如，Liu 等^[19]定量表征了一种新型高伸长率 (>100%) 推进剂内部结构和损伤过程，基于图像仿真方法，采用内聚力模型模拟了在填料/基体界面处的脱湿行为。研究发现，基于同步辐射 X 射线成像和三维重构图像仿真分析可以实现固体推进剂内部各组分的精确提取以及三维拓扑结构的定量描述，全方位表征材料微/细观三维结构以及与载荷有关的变形行为。可见，固体推进剂在拉伸作用下内部微结构损伤行为的研究较多，而在压缩加载下的研究数据相对缺乏。

固体火箭发动机在贮存、运输和使用中承受拉伸载荷外，点火压强、发射过载、撞击等也会严重影响到药柱完整性，导致燃烧异常并影响弹道性能。张泰华等^[20]研究了 NEPE 推进剂准静态压缩损伤对其燃烧性能的影响，发现内部细观结构变化是影响其燃烧行为的主要因素。采用传统的 SEM 技术，吴会民等^[21]分析了压缩加载下 PBX 炸药、压装 B 炸药以及复合固体推进剂 (CSP) 三种含能材料的细观破坏机理；在高应变率压缩与准静态压缩条件下，压装 B 炸药和 CSP 推进剂试样断面细观特征相同，PBX 炸药试样断面细观特征表现有所不同。王冉等^[22]结合高速液压伺服试验机、分离式霍普金森压杆和可编程恒温恒湿试验机等装置，开展了丁羟四组元 HTPB 推进剂的单轴压缩实验。

Ho^[23]研究了预损伤（试验前由恒定应力和单调张力测试引发损伤）固体推进剂的高应变率行为、点火灵敏度和冲击点火机理。Wang^[24]等指出温度和应变率会影响 HTPB 推进剂应力-应变特性，并构建了低温中应变率下的固体推进剂压缩本构模型。前述研究并未关注到压缩载荷作用下固体推进剂内部损伤分布及其演化行为。此外，不同加载条件下固体推进剂损伤失效机制也不尽相同。目前，仍缺乏研究原位表征动载荷下固体推进剂内部三维结构损伤特征以及与颗粒脱湿相关的损伤演化过程，尤其是针对动态压缩下填料颗粒如何影响固体推进剂微裂纹的成核与传播。这将有助于建立关联内部细观损伤特征的本构模型，并为固体推进剂内部结构损伤演化有限元模拟赋予真实的物理过程。

本文利用同步辐射 X 射线成像技术和自主研发的原位压缩试验系统，对 NEPE 固体推进剂的初始态及其在三种压缩速率 0.1 mm/s、1 mm/s 和 5 mm/s 下的内部细观结构进行了原位成像观测。基于同步辐射 CT（Synchrotron Radiation X-ray Micro Computed Tomography, SR- μ CT）原位压缩三维重构结果，描述了动载荷下固体推进剂的宏观变形及内部微裂纹的空间分布，定性分析了其典型损伤与相应的演化行为；基于不同压缩阶段固体推进剂内部细观孔隙形貌，定量讨论了不同载荷速率下推进剂孔隙率随压缩位移的变化过程，统计了不同压缩阶段孔隙等效直径的数量分布；基于无损获得的推进剂内部细观结构特征，探究了微裂纹在固体推进剂内部的形核与传播模式。

1 固体推进剂原位成像实验

1.1 实验系统

应用上海同步辐射光源 BL16U2 线站开展了 NEPE 固体推进剂的原位压缩试验，如图 1 所示。为实现内部损伤的原位三维成像表征，研制了兼容 BL16U2 快速 X 射线成像线站的原位单轴压缩/拉伸试验系统。该原位试验系统驱动力来源于伺服电机，利用图 1 (b) 原位试验系统上部的电动缸将电机的旋转运动转换为电动缸的直线运动。该加载装置可以实现的最大载荷为 3 kN。由于在原位测试过程中样品要旋转 180 度来扫描获得试样的全部信息，试验装置采用透明 PMMA 实现光路方向无遮挡。试验机同其底部连接的高精度 XY 轴微位移台一同固定于 360 度连续旋转直驱转台上。采用吸收衬度成像检测材料内部三维结构，单色光能量为 19 keV，样品到探测器距离为 0.25 m。X 射线穿透样品并通过视场部分到达 Photron SA-Z CMOS 探测器，可以得到 2 μ m 的像素尺寸。

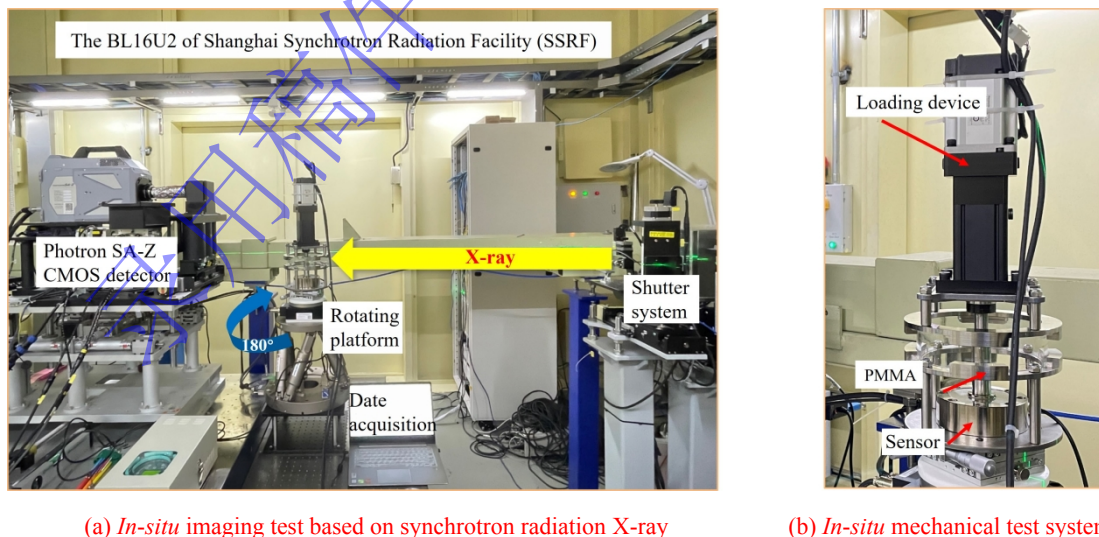


图 1 基于同步辐射 X 射线的原位压缩试验示意图

Fig.1 Schematic of *in-situ* compressive test based on synchrotron radiation X-ray facility

试验样品为某研究所提供的 NEPE 固体推进剂，其中增强相材料主要为高氯酸铵 (AP) 颗粒和微米铝粉 (Al) 颗粒。充分考虑同步辐射 X 射线的穿透能力和最大光斑尺寸，原位测试样品通过定制的方形模具制备成正方形非标试件，尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。

压缩过程采用间断加载模式，一旦达到预设位移量便停止加载。当样品弛豫至载荷不再明显下降后开启成像扫描。首先扫描样品的初始状态，随后分别以 0.1 mm/s 、 1 mm/s 和 5 mm/s 的速率进行原位压缩。每次压缩 0.15 mm 后，暂停测试并成像。为确保压缩致密后的固体推进剂微结构特征能够解析重构，加载共经历 5 个阶段，直至变形量达到 0.75 mm 。原位成像拍摄速度 50 Hz ，快门速度 $1/1000\text{ sec}$ 。成像期间转台匀速旋转 180 度，高速相机连续捕获 1000 帧分辨率为 1024×688 的目标投影图像，扫描时间约 20 s 。考虑到后续图像处理的要求，额外采集了暗场图和明场图。

1.2 三维重构方法

原位成像实验获得的样品断层图像需要利用 PITRE 和 PITRE_BM 软件经投影校正、相位恢复等处理后转换为 8-bit 的 2D 灰度切片，可以在保留图像数据信息的同时很大程度上减小图像尺寸，这将有利于三维重构过程。每个灰度切片被保存为一个 TIFF 文件，采用非局部均值滤波算法对图像堆栈进行去噪处理。根据 Beer-Lambert 定律^[25]，填充颗粒灰度值最大，基体灰度值次之，孔隙（包括孔洞和裂纹）灰度值最小。为分析孔隙率与材料宏观变形之间的关系，样品内部的三维孔隙特征被提取。后处理和三维重构在工作站 (Intel (R) Xeon (R) Gold 5217 CPU @ 3.0 GHz, NVIDIA Quadro P5000 GPU, 128 G RAM) 进行。基于同步辐射 X 射线三维成像技术，在微米级空间尺度对 NEPE 固体推进剂压缩下的损伤行为进行原位观测。如图 2 所示，对材料变形和破坏过程的研究经历了以下阶段。

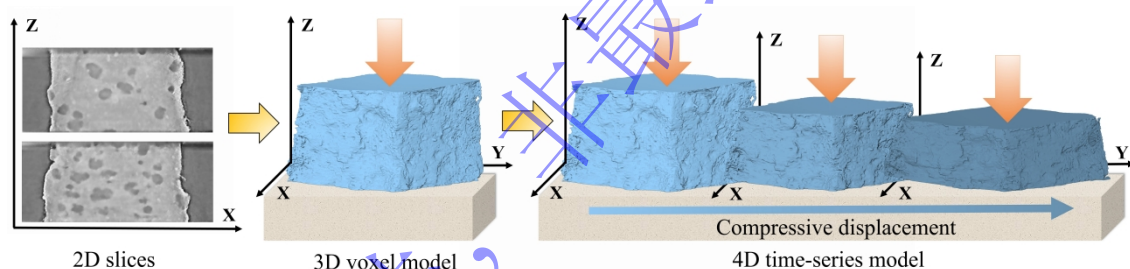


图 2 固体推进剂原位压缩变形的数据重构过程

Fig.2 The procedure of data reconstruction for *in-situ* compressive deformation of solid propellant

2 结果与讨论

2.1 宏观变形与损伤分布

动态压缩加载下，NEPE 固体推进剂表现出宏观变形率相关行为。对比 0.1 mm/s 、 1 mm/s 和 5 mm/s 压缩速率条件下推进剂各变形阶段， 5 mm/s 速率下的样品材料表现出如图 3 (c) 所示的“喇叭”状变形， 0.1 mm/s 和 1 mm/s 速率下的样品材料则呈现出扁平状。随着压缩速率的增加，加载时间越短，塑性应变产生的热量无法传递至外界，可能是导致固体推进剂压缩形貌有所区别的原因。图 3 直观展示了固体推进剂内部损伤分布，观察到在这三种加载速率下微裂纹也并非均匀地分布在样品材料内部，其主要集中于推进剂四周而非中间区域。

图 4 展示了 5 mm/s 压缩速率下固体推进剂的表面损伤及其三维形貌。推进剂表面的宏观破坏由内部微裂纹扩展传播所致。由于填充颗粒与粘合剂基体在压缩变形中的模量不匹配导致界面成为微裂纹形核并传播扩展的薄弱区。首先在推进剂近表面填充颗粒与粘合剂基体的界面处萌生初始裂纹，形成局部应力集中区。随着变形加剧基体材料充分流动拉伸，裂纹沿着比较薄弱的路径迅速扩展导致基体大范围撕裂，且并没有发现裂纹扩展过程中穿过填充颗粒。

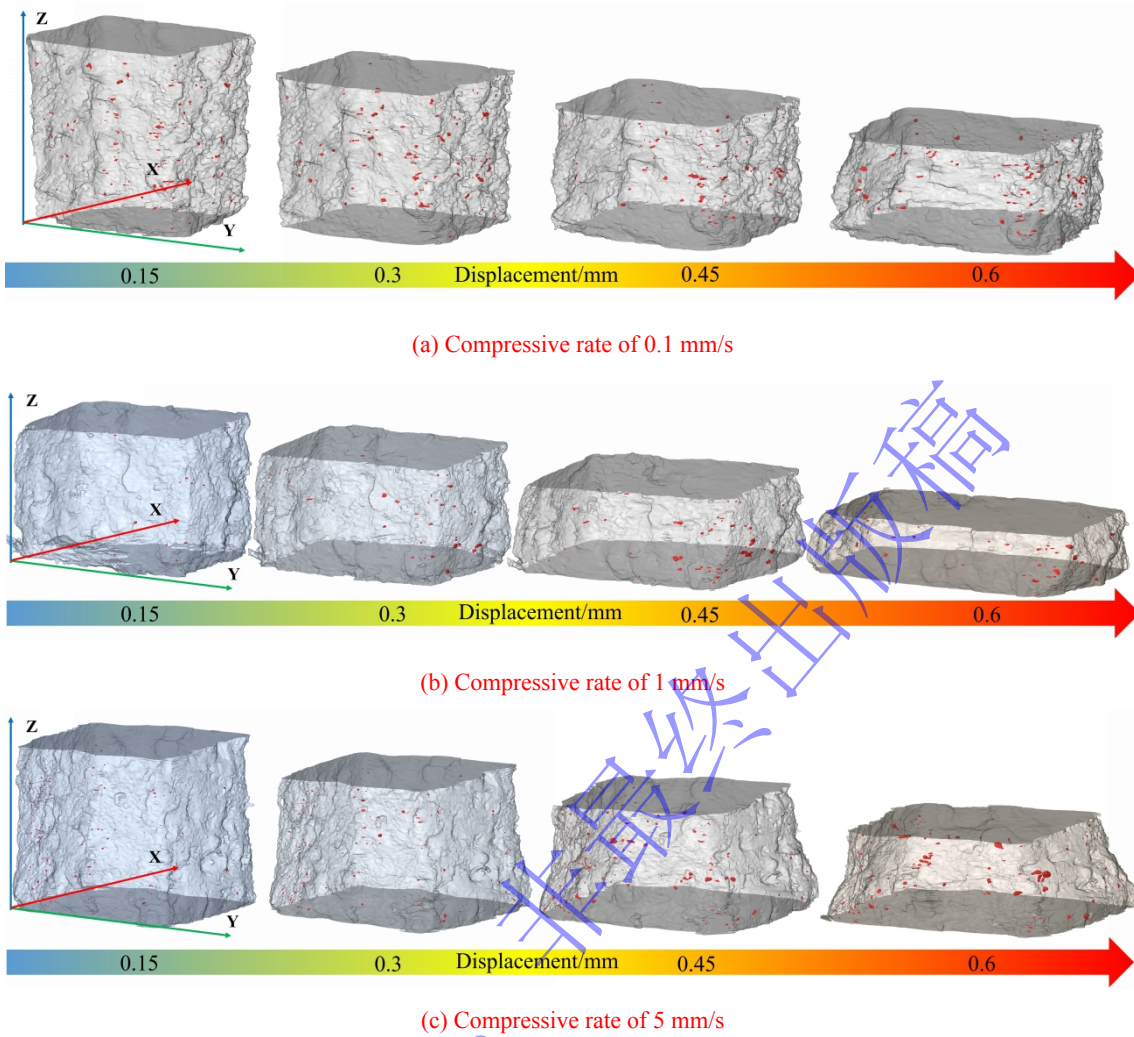


图3 压缩加载下固体推进剂的宏观变形及其内部损伤分布

Fig.3 Macroscopic deformation and internal damage distribution of solid propellants under compressive loading

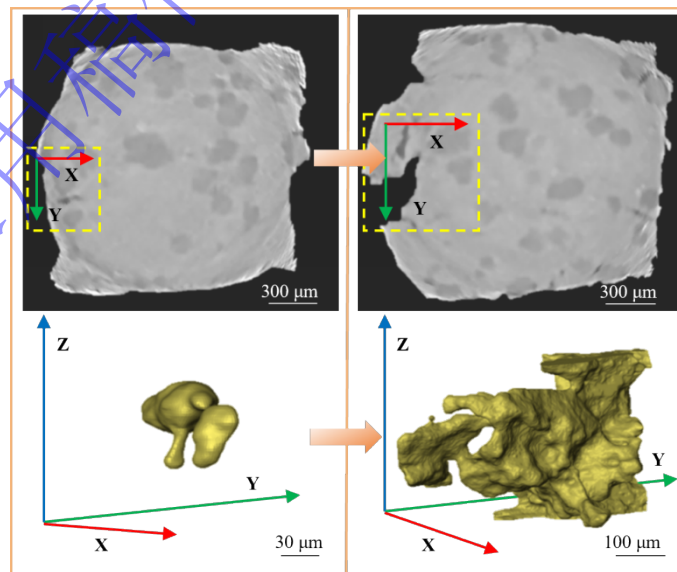


图4 固体推进剂样品在 5 mm/s 压缩载荷作用下的表面损伤

Fig.4 Surface damage of solid propellant sample under compressive loading of 5 mm/s

2.2 微细观结构损伤演化

基于同步辐射原位动态压缩试验无损获取的 NEPE 固体推进剂内部微细观结构图像，对压缩过程中的典型损伤进行定性分析。图 5 (c) 为图像重构后的三维结构，其中 AP 颗粒和 Al 颗粒的灰度值和几何尺寸差异较大。虽然不同压缩速率下固体推进剂内部损伤的体积分数演化有所区别，如图 6 (a) 所示。但就具体缺陷而言，其损伤特征和演化行为具有一定相似性。

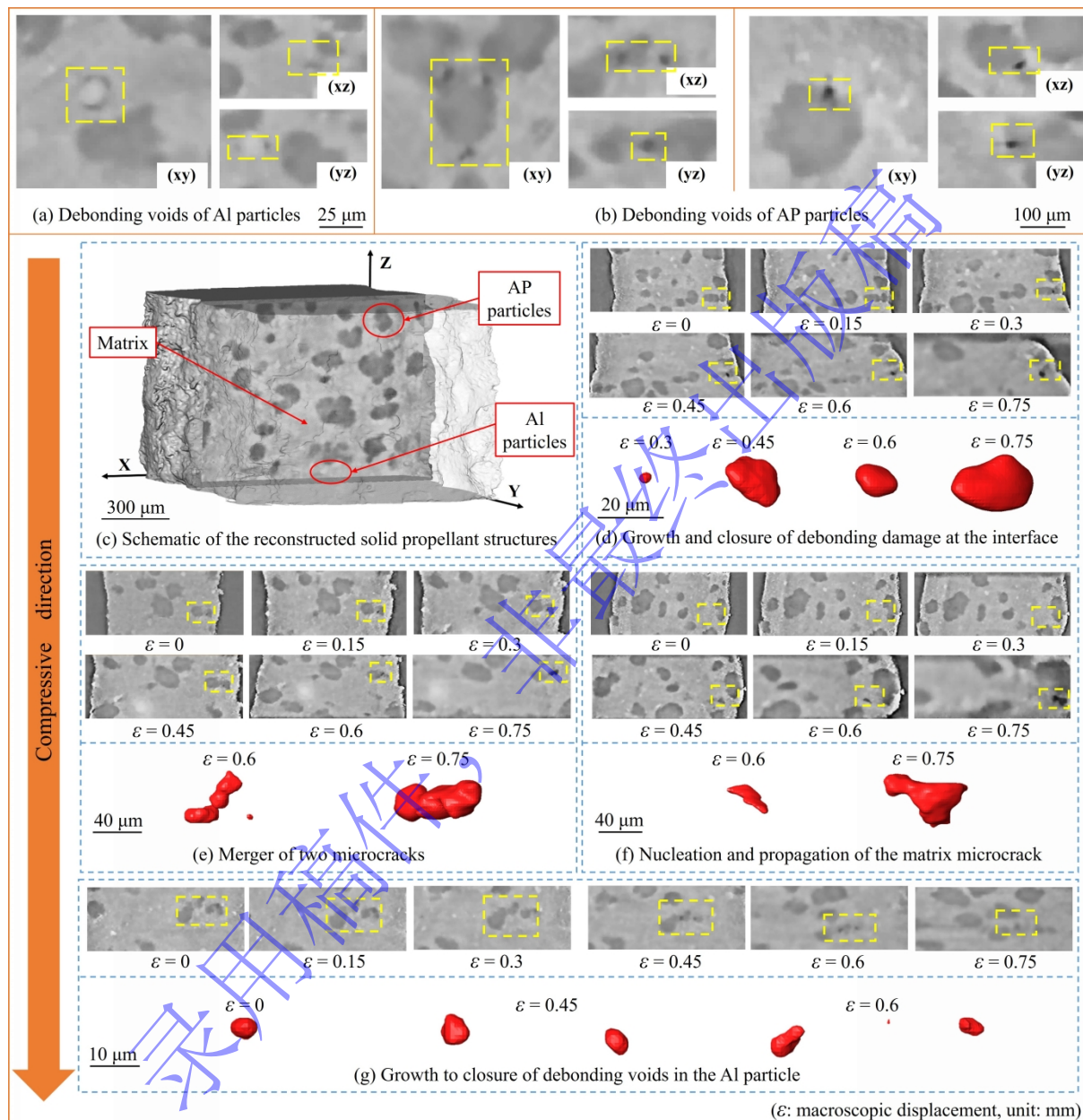


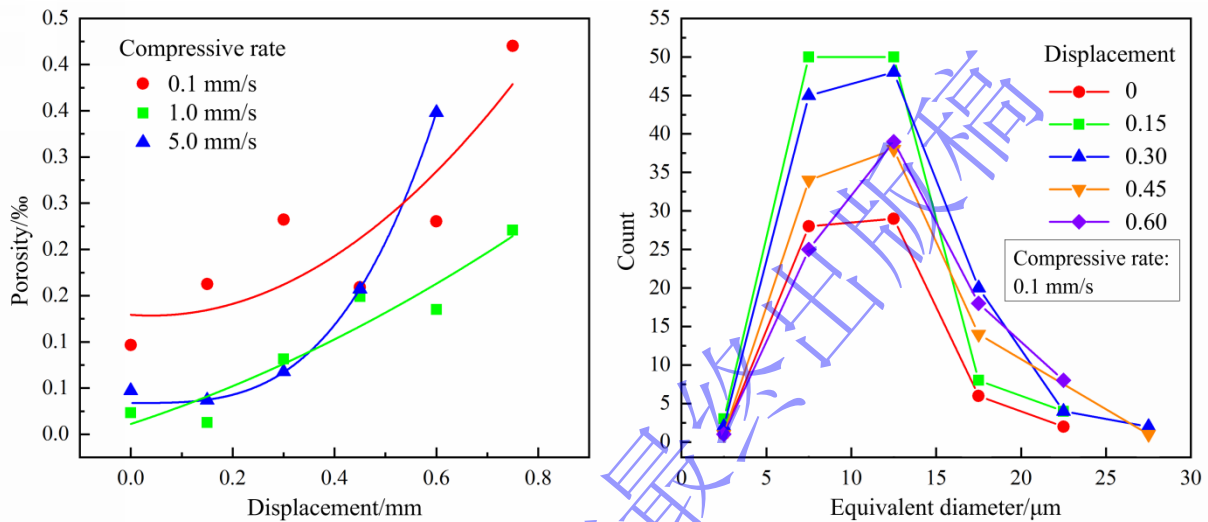
图 5 固体推进剂微结构示意图和典型损伤及演化行为

Fig.5 Schematic of solid propellant microstructures & typical damages and evolutionary behaviors

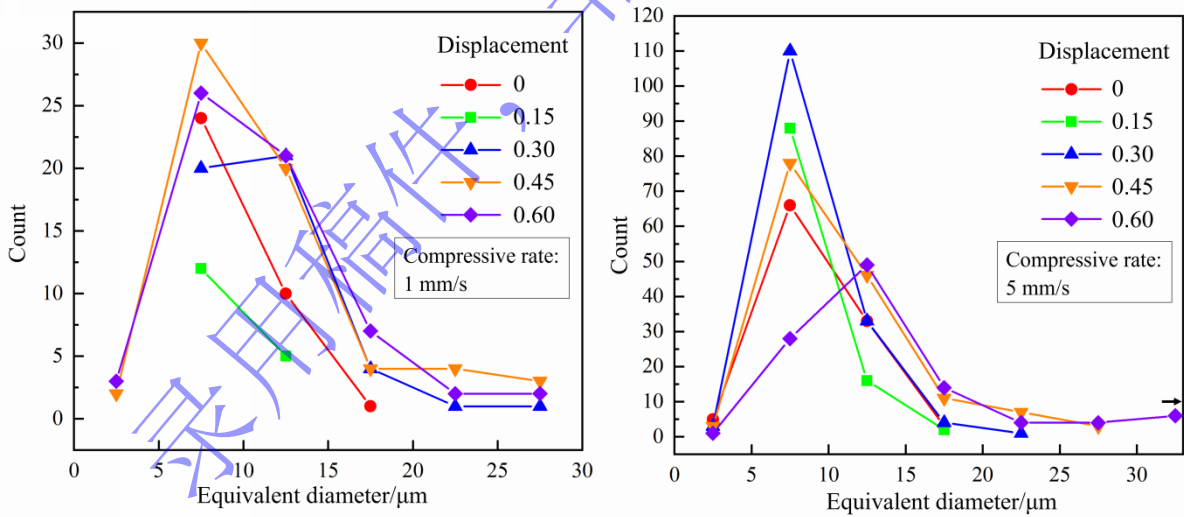
与固体推进剂在拉伸加载时损伤持续生长不同，初始缺陷或产生的新损伤会在压缩中发生闭合。例如，体积较小的 Al 颗粒产生围绕颗粒的界面脱湿，如图 5 (a) 所示；图 5 (g) 则展示了该 Al 颗粒脱湿经历了从初始损伤生长直到完全闭合的过程。与 Al 颗粒不同，较大体积 AP 颗粒的损伤形式为局部界面脱湿，包括多颗粒处界面脱湿和单颗粒处界面脱湿，如图 5 (b) 所示。相对于 AP 颗粒特征尺寸，其损伤尺寸较小且并不会包覆颗粒。图 5 (d) 进一步说明了 AP 颗粒和基体界面处的脱湿损伤在压缩加载中会出现生长和闭合行为。粘合剂基体裂纹作为一种损伤形式，图 5 (f) 则展示

了基体微裂纹的形核与传播扩展过程，其在深度和长度方向均有生长。同时，还观察到裂纹合并行为，AP 颗粒周围垂直加载方向和沿加载方向排列的两个微裂纹最终合并成一个垂直加载方向的裂纹，如图 5 (e) 所示。上述损伤演化结果表明，在动态压缩载荷作用下，大多数微裂纹形核并生长于填充颗粒附近，颗粒的特征尺寸影响固体推进剂细观损伤特征。压缩加载下推进剂发生界面脱湿、基体撕裂和裂纹合并等损伤演化行为，损伤的形核、生长与闭合同时存在。

高分辨 X 射线三维成像已经发展为一种定量分析技术，而不是局限于定性成像表征^[26, 27]。基于三维重构的固体推进剂内部三维细观孔隙，可以定量分析材料孔隙率随压缩位移的演化行为以及不同载荷速率下孔隙的分布情况。



(a) Variation of porosity at different compressive rates (b) Distribution of internal damage under 0.1 mm/s loading



(c) Distribution of internal damage under 1 mm/s loading (d) Distribution of internal damage under 5 mm/s loading

图 6 不同压缩速率下固体推进剂内部损伤孔隙的变化

Fig.6 The evolution of internal pores of solid propellant at different compressive rates

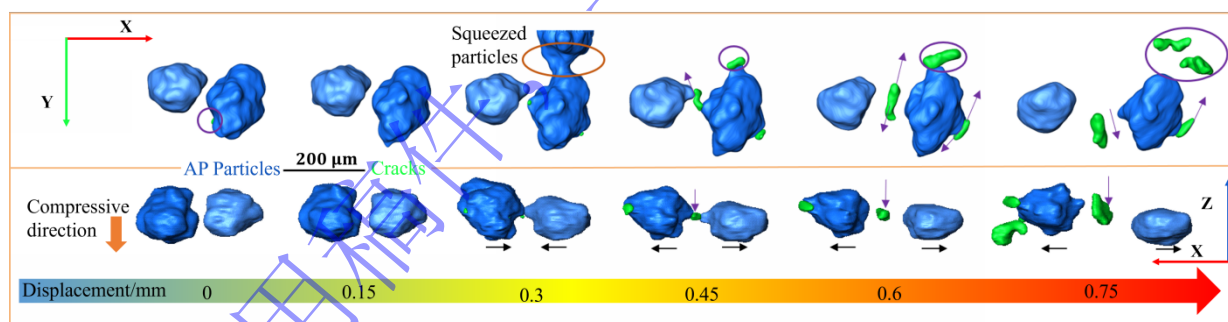
由图 6 (a) 可知，固体推进剂在压缩载荷作用下的损伤演化行为具有率相关性。随着载荷速率增加，孔隙率增长更为显著，但还要考虑到未加载时初始孔隙的影响。此外，还观察到孔隙率有降低的情况，这与拉伸载荷作用下推进剂孔隙率随宏观变形增加而持续增长的结果不同。在压缩加载下，固体推进剂微细观结构的相互挤压导致了部分已形成的内部孔隙缩小或闭合。这种孔隙的生长和闭合效应在 0.1 mm/s 压缩速率下更为突出，出现了孔隙率的明显降低再上升现象。图 6 (a) 孔隙

率变化曲线表明, 5 mm/s 工况下, 当位移量达到 0.3 mm 时推进剂孔隙率快速上升。随着固体推进剂宏观变形加剧, 更加加载速率下的孔隙率增长也更为明显。

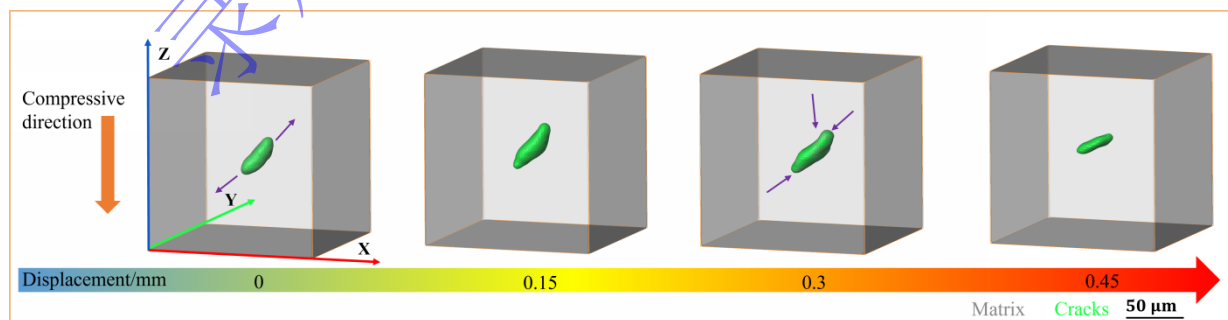
使用等效直径量化分析固体推进剂内部孔隙的三维形貌特征^[18]。等效直径可以理解为与孔隙体积相等的球体的直径, 用于描述不规则孔隙的大小和分布情况。图 6 (b) - (d) 具体分析了孔隙等效直径在固体推进剂不同宏观变形阶段中对应的演化规律。由于 5 mm/s 速率下的样品材料在压缩位移至 0.75 mm 时出现了表面裂纹, 难以准确提取该阶段的孔隙特征, 因此未对比分析此压缩阶段的孔隙等效直径。在初始阶段, 三种加载速率下的固体推进剂样品内部均存在少量缺陷。对比图 6 (b)、(c) 和 (d) 发现, 固体推进剂压缩变形的各阶段, 微裂纹大多集中于 5-20 μm 等效直径之间。0.1 mm/s 和 1 mm/s 压缩速率下, 固体推进剂内部孔隙等效直径分布在 0-30 μm 之间, 5 mm/s 速率下则出现了大于 30 μm 的孔隙, 这表明高载荷速率作用时更容易形成较大的内部孔隙。

2.3 微裂纹传播模式

对比分析 0.1 mm/s、1 mm/s 和 5 mm/s 速率下的固体推进剂内部损伤演化原位成像结果, 观察到微裂纹在动态压缩加载下的代表性扩展模式。在拉伸载荷作用下, 裂纹通常形核于沿加载方向的 AP 颗粒顶部或底部, 并沿颗粒上下侧表面发生水平扩展传播^[18]。与之不同的是, 当施加压缩载荷时裂纹主要沿垂直于载荷方向的 AP 颗粒侧部形核, 如图 7 (a) 所示。由于固体推进剂中含有大量填充颗粒, 这些颗粒在压缩过程中存在挤压、接触与远离。由图 7 (a) XY 视图可知, 压缩位移为 0.3 mm 时, 两个 AP 颗粒之间发生接触, 当相互接触颗粒的空间位置发生改变时, 在其接触位置引入了新的裂纹; 随着进一步压缩, 该裂纹逐渐生长并从颗粒侧部裂纹转变为基体裂纹。通过观察, 发现裂纹的形核生长与 AP 颗粒水平排列方式有关。两颗粒沿图 7 (a) XY 视图的 Y 方向排列时, 裂纹在 X 方向扩展传播; 两颗粒沿 X 方向排列时, 裂纹则在 Y 方向扩展传播。这种横向扩展模式使得微裂纹长度增加。图 7 (a) XZ 视图表明, 压缩载荷作用下微裂纹存在轴向扩展模式, 即裂纹传播方向与加载方向基本平行, 使得裂纹深度增加。这也与图 4 中裂纹的演化行为相一致, 随着压缩加剧界面处微裂纹逐步扩展导致粘合剂基体撕裂。



(a) Growth of representative cracks



(b) Closure of a representative crack

图 7 动态压缩下固体推进剂代表性的裂纹扩展模式

Fig.7 Representative crack propagation modes of solid propellant under dynamic compression

通过追踪固体推进剂代表性裂纹演化过程, 捕捉到典型内部微裂纹闭合行为, 如图 7 (b) 所示。裂纹的闭合行为与动态压缩下固体推进剂变形状态相关。基体初始轴向裂纹逐步演化为横向裂纹, 压缩位移增加后微裂纹最终趋于闭合。微裂纹在压缩中的闭合行为与 2.2 小节所讨论一致。

3 结论

基于同步辐射 X 射线三维成像和原位压缩加载系统捕获的 NEPE 固体推进剂内部损伤特征及其在不同压缩阶段的演化行为, 得到如下结论:

(1) 在高速单轴压缩载荷作用下, NEPE 固体推进剂更容易产生“喇叭”状形貌, 近表面颗粒与基体界面处的微裂纹扩展将导致基体撕裂, 从而造成表面宏观破坏。

(2) NEPE 固体推进剂在动态压缩加载下, 微裂纹主要形核并生长于填充颗粒与基体界面处。由于 AP 颗粒和 Al 颗粒特征尺寸不同, AP 颗粒更容易形成多颗粒处界面脱湿, 且损伤并不会覆盖 AP 颗粒表面。

(3) 由于压缩加载下 NEPE 固体推进剂内部孔隙的形核、生长与闭合同时存在, 推进剂孔隙率不会持续增长。NEPE 固体推进剂作为具有率相关性的颗粒填充复合材料, 在动载荷下其细观孔隙的演化行为也表现出率相关性。高速加载时, 随着固体推进剂宏观变形其孔隙率的非线性增长更为明显, 且容易形成较大的内部孔隙。

(4) 动载荷下微裂纹主要沿垂直于压缩方向的 AP 颗粒侧部形核, 填充颗粒之间的挤压与分离将进一步导致裂纹扩展, 促使相互分离颗粒之间的基体撕裂。固体推进剂内部微裂纹存在横向和轴向两种传播模式。当裂纹形核后, 横向传播模式导致裂纹沿垂直于加载方向的长度增加, 轴向传播模式则导致裂纹沿加载方向的深度增加。同时, 基体竖直取向微裂纹易发生向水平取向微裂纹的转变, 从而导致裂纹闭合。

需要指出的是, 目前关于原位表征动态载荷下固体推进剂内部结构损伤演化规律的研究鲜有报道, 本文表征了三种不同压缩速率下 NEPE 推进剂的内部损伤行为, 并总结了具有共性特点的微裂纹传播模式。此外, 还可以进行动态拉伸和更宽、更高应变速率范围的原位成像表征。为进一步推动固体推进剂结构完整性评估, 可以从以下两方面开展研究: 一方面, 基于同步辐射 X 射线显微断层扫描技术对固体推进剂内部结构进行精确表征, 可深入分析损伤破坏行为机理, 进而建立关联内部细观损伤特征的本构模型; 另一方面, 结合基于原位三维损伤图像的微细观结构演化高保真有限元模拟, 可以为损伤演化赋予真实的物理过程。

参考文献

- [1] BECKSTEAD M W, PUDUPPAKKAM K, THAKRE P, et al. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(6): 497-551. DOI: 10.1016/j.peccs.2007.02.003.
- [2] 余家泉, 许进升, 陈雄, 等. 推进剂/包覆层界面脱粘率相关特性研究 [J]. *航空学报*, 2015, 36(12): 3861-3867. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0089.
- [3] YU J Q, XU J S, CHEN X, et al. Rate-dependent property of propellant and inhibitor interface debonding [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(12): 3861-3867. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0089.
- [4] 陈雄, 许进升, 郑健. 固体推进剂黏弹性力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 142-179.
- [5] 侯晓, 张旭, 刘向阳, 等. 固体火箭发动机药柱结构完整性研究进展 [J]. *宇航学报*, 2023, 44(04): 566-579. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.04.011.
- [6] HOU X, ZHANG X, LIU X Y, et al. Research progress on structural integrity of solid rocket motor grain [J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(04): 566-579. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.04.011.
- [7] 赵伯华, 辛振河, 沈月萍. 固体推进剂的体积模量与体积蠕变 [J]. *兵工学报*, 1993(01): 87-91.

- ZHAO B H, XIN Z H, SHEN Y P, et al. Bulk modulus and bulk creep of solid propellants [J]. *Acta Armamentarii*, 1993(01): 87-91.
- [6] JANA M K, RENGANATHAN K, RAO G V. A method of non-linear viscoelastic analysis of solid propellant grains for pressure load [J]. *Computers & Structures*, 1994, 52(1): 61-67. DOI: 10.1016/0045-7949(94)90256-9.
- [7] TUSSIWAND G S, SAOUMA V E, TERZENBACH R, et al. Fracture mechanics of composite solid rocket propellant grains: material testing [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(1): 60-73. DOI: 10.2514/1.34227.
- [8] XU F, ARAVAS N, SOFRONIS P. Constitutive modeling of solid propellant materials with evolving microstructural damage [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(5): 2050-2073. DOI: 10.1016/j.jmps.2007.10.013.
- [9] RAE P J, PALMER S J P, GOLDREIN H T, et al. Quasi-static studies of the deformation and failure of PBX 9501 [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 458(2025): 2227-2242. DOI: 10.1098/rspa.2002.0967.
- [10] ZHOU Z B, CHEN P W, HUANG F L, et al. Experimental study on the micromechanical behavior of a PBX simulant using SEM and digital image correlation method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3): 366-370. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.11.001.
- [11] MILLER T C. Damage and dilatometry for solid propellants with digital image correlation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(2): 234-245. DOI: 10.1002/prep.201800283.
- [12] 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(01): 63-67. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.202109010.
- YANG Q Q, XU S L, QIANG F Z, et al. Study on fractal dimension of SEM images of solid propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2021, 19(01): 63-67. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.202109010.
- [13] BUFFIERE J Y, MAIRE E, ADRIEN J, et al. In situ experiments with X ray tomography: an attractive tool for experimental mechanics [J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50: 289-305. DOI: 10.1007/s11340-010-9333-7.
- [14] 吴圣川, 吴正凯, 胡雅楠, 等. 同步辐射光源四维原位成像助力材料微结构损伤高分辨表征 [J]. *机械工程材料*, 2020, 44(06): 72-76. DOI: 10.11973/jxgccl202006016.
- WU S C, WU Z K, HU Y N, et al. High-resolution characterization of microstructural damage in materials by synchrotron radiation source 4D in-situ tomography [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(06): 72-76. DOI: 10.11973/jxgccl202006016.
- [15] WEN H D, CHERUKARA M J, HOLT M V. Time-resolved X-ray microscopy for materials science [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2019, 49: 389-415. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124014.
- [16] KERSCHEN N E, SORENSEN C J, GUO Z, et al. X-Ray phase contrast imaging of the impact of a single HMX particle in a polymeric matrix [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(4): 447-454. DOI: 10.1002/prep.201800002.
- [17] 王龙, 刘岳勋, 吴圣川, 等. 基于原位 X 射线成像的推进剂损伤演化表征 [J]. *航空学报*, 2023, 44(07): 276-287. DOI: 10.7527/S1000-6893/2022.27022.
- WANG L, LIU Y X, WU S C, et al. In-situ X-ray tomography based characterization of propellant damage evolution [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(07): 276-287. DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.27022.
- [18] 魏晋芳, 赖国栋, 柴海伟, 等. 准静态拉伸下固体推进剂三维结构变形损伤失效机理研究 [J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(02): 186-194. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2023.02.003.
- WEI J F, LAI G D, CHAI H W, et al. Research on three-dimensional structural deformation failure mechanism of solid propellant under quasi-static tension [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(02): 186-194. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2023.02.003.
- [19] LIU Y X, QIAN W J, WANG L, et al. *In situ* X-ray tomography study on internal damage evolution of solid propellant for carrier rockets [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 882: 145451. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145451.

- [20] 张泰华, 白以龙, 王世英, 等. 准静态压缩对高能固体推进剂燃烧行为的影响 [J]. *兵工学报*, 2000(04): 365-367. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2000.04.020.
ZHANG T H, BAI Y L, WANG S Y, et al. Quasi-static compression of high-energy solid propellants and their combustion [J]. *Acta Armamentarii*, 2000(04): 365-367. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2000.04.020.
- [21] 吴会民, 卢芳云, 卢力, 等. 压缩加载下三种含能材料微观破坏特征观察 [J]. *高压物理学报*, 2005(03): 213-218. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2005.03.004.
WU H M, LU F Y, LU L, et al. Microstructure fractal characteristics of energetic materials under compressive loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005(03): 213-218. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2005.03.004.
- [22] 王冉, 武毅, 白龙, 等. 宽温域宽应变率下丁羟四组元 HTPB 推进剂单轴压缩力学行为 [J]. *含能材料*, 2024, 32(02): 183-192. DOI: 10.11943/CJEM2023119.
WANG R, WU Y, Bai L, et al. Uniaxial compressive mechanical behavior of four-component HTPB propellant under wide temperature and strain rate range [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(02): 183-192. DOI: 10.11943/CJEM2023119.
- [23] HO S Y. High strain-rate impact studies of predamaged rocket propellants. I. characterization of damage using a cumulative damage failure criterion [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 104(4): 524-534. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00166-2.
- [24] WANG Z J, QIANG H, F WANG T J, et al. A thermovisco-hyperelastic constitutive model of HTPB propellant with damage at intermediate strain rates [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2018, 22: 291-314. DOI: 10.1007/s11043-017-9357-9.
- [25] VISHAL V, CHANDRA D. Mechanical response and strain localization in coal under uniaxial loading, using digital volume correlation on X-ray tomography images [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 154: 105103. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105103.
- [26] QIAN W J, WU S C, LEI L M, et al. Time lapse *in situ* X-ray imaging of failure in structural materials under cyclic loads and extreme environments [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 175: 80-103. DOI: 10.1016/j.jmst.2023.07.041.
- [27] WITHERS P J, PREUSS M. Fatigue and damage in structural materials studied by X-ray tomography [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2012, 42: 81-103. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070511-155111.