

文章编号:1006-9941(2022)12-1272-10

基于数字体图像相关法的TATB基PBX材料内部变形测量

王延珺¹,邹翔²,潘兵²,郭昱辰¹,刘晨¹,韩超¹,吕珂臻¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 北京航空航天大学固体力学所, 北京 100191)

摘要: 研究采用 μ -CT对单轴压缩过程中的三氨基三硝基苯(TATB)基高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosives, PBX)试件进行了原位扫描,获得了不同载荷下试件的三维数字体图像;采用基于反向组合高斯-牛顿配准算法(Inverse Compositional Gauss-Newton, IC-GN)的局部数字体图像(Digital Volume Correlation, DVC)方法分析了试件加载前后的2组数字体图像,获得了试件内部具有亚像素精度的三维位移场和应变场;基于获得的应变场根据胡克定律弹性本构关系,重建试件内部的三维应力场。研究表明,基于 μ -CT和DVC结合的内部变形测量技术能够直观地揭示试件内部应变局部化区域的产生,并识别亚像素微裂纹在样品中的位置。

关键词: 高聚物黏结炸药(PBX);数字体图像相关法;三维内部变形场测量

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021267

0 引言

高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosives, PBX)作为一种高能炸药晶体和高聚物黏结剂组成的复合材料,因其具有能量高、钝感、耐热的优点,在国防工业中得到了广泛应用。PBX材料中的炸药晶体和黏结剂在含量、热物理性能方面均存在较大差异,因此组分之间存在性质各异的界面。同时,PBX材料是一种典型的脆性材料,其抗拉强度较低,力学性能极易受振动、冲击、热加载等环境因素影响^[1-3]。将PBX材料压制成型为部件时,内应力释放机制会使成型部件发生弹性回弹,影响其稳定性。此外,PBX材料在热处理、机械加工、运输及存储过程中产生的内应力会使晶体断裂、界面脱粘、黏结剂基体开裂,造成PBX材料力学

性能的下降^[4-5],因此极需了解PBX内应力演化规律及微观结构演化机理的识别方法。

现有PBX的原位力学性能测试方法主要有接触式与非接触式,然而都存在一定局限性。如采用表面贴片应变计测量炸药部件的力学响应时,由于PBX材料属于非均匀材料,所获得的测量值仅能反映小范围被测表面的平均效应;若采用预埋传感器测量,介入式传感器会改变材料内部结构,引入较大的测量误差。非接触方法相比于以上接触式方法,能够极大地减小测量误差,主要有射线法、光测力学法。基于布拉格晶格衍射原理的射线法(X/中子衍射)仅能获得浅表层小体积内的晶格畸变,从而可以反映出束斑区域的晶体变形信息^[6]。然而,对PBX材料的裂纹检测多见于晶体与高分子黏结剂的界面失效^[2]。因此,射线法无法反映高分子黏结剂对PBX复合材料的三维应变应力响应的影响。近10余年来,利用光测力学手段,如数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)测量PBX材料在热力作用下的表面位移场及应变场开始兴起^[7]。然而2D-DIC,3D-DIC仅可用于表面变形测量^[8],获取的是材料表面位移的2个或3个自由度分量。非均匀材料的表面变形场分布与内部变形场分布往往有显著的差异,仅依赖表面的位移分析并不能得到非均匀材料体系内部变形的准确信息。故而,常规

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-12-18

网络出版日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(11502251),中国工程物理研究院创新发展基金(CX2019012)

作者简介: 王延珺(1992-),女,副教授,主要从事材料热力学行为研究。e-mail: emilie.wangyanjun@qq.com

通信联系人: 潘兵(1978-),男,教授,主要从事实验固体力学方法、应用及其仪器化的研究。e-mail: panb@buaa.edu.cn

吕珂臻(1985-),男,高级工程师,主要从事含能材料压制及时效基础研究。e-mail: lkzh100@163.com

引用本文: 王延珺,邹翔,潘兵,等. 基于数字体图像相关法的TATB基PBX材料内部变形测量[J]. 含能材料, 2022, 30(12):1272-1281.

WANG Yan-jun, ZOU Xiang, PAN bing, et al. 3D Deformation Measurement in TATB Based PBX Based on Digital Volume Correlation With μ -Computed Tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(12):1272-1281.

测试手段无法实现 PBX 这种多晶、多界面、非均质的复杂材料体系在外载荷作用下的三维力学响应表征。

基于 X 射线微焦点计算机断层扫描(μ -CT)技术和数字体图像相关(Digital Volume Correlation, DVC)算法的物体内部变形测量技术是实验固体力学的前沿研究方法。作为可用于不透明固体材料内部变形场测量的实验力学技术,DVC 方法在实验力学、岩土力学、材料科学、生物医学等领域受到关注^[9],在含能材料领域内研究刚刚起步。美国 Los Alamos 国家实验室的研究团队利用 IMPULSE 同步辐射先进光源 APS,对奥克托今(HMX)基 PBX 炸药在动态压缩实验进行了表征和追踪,测量了冲击过程的晶体破碎形貌,但未能对应力应变演化进行深入分析^[10]。法国巴黎萨克雷大学的 Hild^[11]与法国军用核能中心 CEA-Gramat 研究团队将 DVC 方法应用于 ESRF 加速器 CT 原位观测下的 HTPB 推进剂材料单轴拉伸实验,通过计算全局体积应变获得材料在不同载荷状态下的泊松比,通过局部分析各计算单元内的平均应变获得模拟材料晶体与黏结剂 2 种主要组分的非均匀变形状态,并且 DVC 法的灰度残余分布图能够精确地表明材料的损伤程度与开裂机理,该方法对于揭示含能材料内部变形机制具有重要意义^[11]。英国牛津大学的 Siviour 等^[12]借助原位 CT 实验,利用 DVC 法获得了含能材料造型粉颗粒在压制过程中的三维位移场、应变场等高精度信息,DVC 方法获得的材料单轴压缩力学响应与有限元仿真模型数值预测结果符合度良好,为进一步推导应力场分布提供了必要条件。该团队与 Los Alamos 国家实验室将 DVC 方法应用于 PBX 试样在单轴压缩过程中的变形测量,揭示了内部不均匀应变场分布与微观结构演变的关联关系,挖掘出丰富的力学信息:内部单个造型粉颗粒的运动,内部裂纹的形成与拓展,黏结剂与晶体的脱粘以及试样的断裂机制。美国德州大学达拉斯分校的 Hu 等^[13]采用 DVC 方法测量了曼森砂在围压实验中的内部应变场,并通过分析各个颗粒的最小本征应变值评估了压缩过程中的力链形成与演化过程^[14],对于揭示颗粒材料体系压制成型的机理机制具有重要意义。北京航空航天大学的潘兵等^[15]利用自己开发的增量 DVC 算法系统研究了推进剂代用材料在单轴压缩实验过程中压缩应变从 10% 增加到 70% 过程中其内部应变场变化情况。由此可见,该方法能够定性定量地分析含能材料在原位力学实验中的变形状态,对于开展相关研究具有一

定的参考意义。当晶体颗粒填充比例较低时,所获得的数字图像灰度对比度大,对变形状态的测量相对容易实现。

为此,本研究将基于 μ -CT 和 DVC 结合的方法应用于 TATB 基 PBX 材料内部变形测量的探索。由于 PBX 内部组分密度接近,数字图像灰度值对比度相对较低,在小变形状态下即会发生断裂,因而研究在采用 μ -CT 对单轴压缩下的 PBX 圆柱试件进行了体成像扫描后,为提高内部组分纹理对比度,将图像进行预处理,采用自编的基于 C++ 语言的局部 DVC 算法,对所得 PBX 的 CT 成像的灰度图原始数据进行计算,揭示了 TATB 基 PBX 材料在单轴压缩实验中的三维内部变形状态,并提出了通过 DVC 计算获得的零均值归一化互相关(zero-mean normalized cross-correlation, ZNCC)系数分布图来判定亚体素裂纹的空间位置的方法。

1 原位实验与图像分析方法

1.1 TATB 基 PBX 材料单轴压缩实验

样品试件:TATB 基 PBX 试件为 120 °C、150 MPa 压制的直径为 10 mm、高度为 10.2 mm 药柱(图 1),药柱密度为 1.876 g·cm⁻³。

仪器:单轴压缩实验采用配置 Deben Microtest CT5000-TEC 原位加载装置的原位 μ -CT 进行。

实验方法:室温下对 TATB 基 PBX 试件进行同步的单轴压缩实验和 CT 观测。为采集压缩过程中的变化图像,实验对样件加载后,再进行 CT 扫描。由于应力松弛,载荷均会出现下降,因此不同的时刻进行 CT 扫描后继续进行加载,如此循环加载扫描步骤,直至试件发生破坏后停止实验,本研究为此连续进行 5 次加载。加载模式为位移加载模式,加载速率为 0.1 mm·min⁻¹,实验力-位移载荷如图 1 所示。CT 扫描电压为 100 kV,

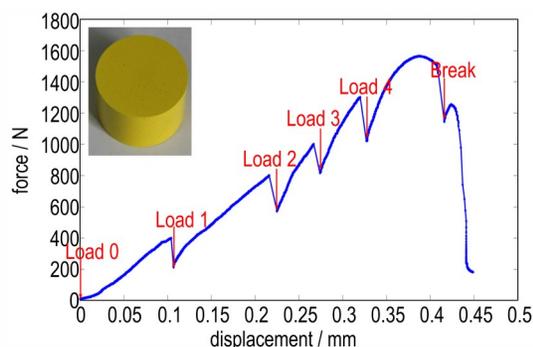


图 1 TATB 基 PBX 材料试件在单轴压缩下的力-位移曲线

Fig. 1 Loading curve of TATB-based PBX sample under uniaxial compression test

电流为 $100\ \mu\text{A}$, 曝光时间为 $0.6\ \text{ms}$, 试件旋转过程中每隔 0.33° 采集 1 张图像, 共采集 1080 张图像, 获取的体图像尺寸为 $550\ \text{voxel} \times 550\ \text{voxel} \times 500\ \text{voxel}$ 。实验过程中保持 CT 扫描参数相同, 以减小测量参数对结果的影响, 保证在相同条件下对试件内部形变带来的灰度变化进行追踪, 进而实现对内部变形及损伤演化的定量分析。实验中调节样品与探测器之间的距离, 使 TATB 基 PBX 材料的 CT 体图像分辨率为 $19.8\ \mu\text{m}$ 。

1.2 数字体图像相关法(DVC)

数字体图像相关法(DVC)可通过对比分析数字体成像设备得到的试件变形前后的 2 组数字体图像, 经由计算感兴趣区域内的灰度变化获得物体内部亚体素精度的三维位移场和全场应变^[9]。DVC 法分析主要包括以下 3 个步骤:

(1) 数字体图像的采集: 采用体成像设备对不同加载状态下的试件进行扫描, 得到试件的数字体图像; (2) 三维位移场的测量: 通过体图像配准算法^[9]确定参考体图像中各离散计算点在目标体图像中的位置, 获得全场三维位移; (3) 三维应变场计算: 利用数值微分方法处理得到三维位移场, 获得三维应变场。

为此, 本研究通过单轴压缩实验获取了 4 种载荷状态下的试件体图像。为准确研究试件变形引起的部分计算点灰度变化, 同时对图像进行了预处理, 以提升体图像纹理对比度, 进而保证 DVC 计算精度。用 DVC 对原始图片直接进行处理, 在 4 种载荷下, 基于 C++ 编程的 DVC 算法对原始图片的计算速度分别为 8.26 点/秒, 7.53 点/秒, 6.22 点/秒和 5.11 点/秒, 从计算时间看, 随着载荷的加大, 试样变形越大, 故而所需计算时间越长。

三维应变场获取的关键是三维位移场的测量精度。为确定某计算点的三维位移矢量, 需要围绕该点选择包含足够灰度对比度的立方体参考图像子体块, 并建立一个可定量评价参考图像子体块和待寻找的目标图像子体块相似程度的目标函数。本研究采用零均值归一化互相关 (zero-mean normalized sum-of-square difference, ZNSSD) 函数来评价 2 子体块的相似程度^[18]。由于目标图像子体块可能出现包括平移、转动、均匀应变甚至更为复杂的非均匀变形, 因而需要采用包括 12 个变量的一阶形函数^[16]来近似其内部变形, 再通过数值优化算法和灰度插值算法相结合来优化目标函数, 以在变形后的体图像中寻找与图像子体块最为相似的目标图像子体块, 从而确定其当前体素点(参考图像子体块中心点)的位移矢量。通过简单的

整体素搜索, DVC 能快速确定各计算点的整体素位移。随后, 为了提高测量精度, 需要采用亚体素配准算法对整像素结果进行优化以获得具有亚体素精度的位移结果, 这一过程通常被认为是提高 DVC 测量精度的关键^[9]。在众多亚体素位移算法中, 反向组合高斯-牛顿算法 (Inverse Compositional Gauss-Newton, IC-GN) 因为具有计算精度和计算效率高等优点被广泛应用。本研究采用最新的三维 IC-GN 配准算法, 插值方法采用 3 次 B 样条插值方法, 形函数采用一阶形函数, 应变计算采用逐点最小二乘 (pointwise least-square, PLS) 算法进行运算。

为了保证计算效率和精度, 使计算能够在普通计算机中使用 DVC 方法对高分辨率体图像进行分析, 本次分析采用逐层可靠性导向的初值估计策略为计算点提供位移初值^[17], 由于在加载过程中, 试样没有发生较大的旋转运动, 因此可靠性导向种子点的位移初值采用简单的整体素搜索方法。与现有文献中提出的常规三维可靠性导向位移跟踪方法不同, 逐层可靠性导向方法仅仅引导每个计算层内的计算路径并传递相邻计算层之间的变形矢量以保证初值精度。

2 结果与讨论

2.1 体图像预处理对 DVC 结果的影响

在 DVC 计算中, ZNCC 系数(变化范围为 $[-1, 1]$) 被广泛应用于判断 DVC 计算点的匹配程度, ZNCC 系数越高, 说明计算点的参考子体块和变形子体块匹配越好, 此时获得的位移场精度越高, 相反地, 当一计算点的 ZNCC 系数低于某一设定值时就认为该点匹配失败, 位移场误差较大^[9]。为了获取较高的 ZNCC 系数, 研究采用降噪方法对试件的体图像图像进行了预处理, 并对比分析了预处理前后的 DVC 计算结果。

图 2 为原始 CT 体图像预处理前, DVC 计算得到的各计算点处的 ZNCC 系数分布图。由图 2 可以看出, 在 4 种载荷下, 各计算点 ZNCC 系数均较低, 均值仅分别为 0.696、0.672、0.670 和 0.668, 这主要是由于试件体图像内部体图像特征不明显, 抗噪声能力较弱; 此外, 随着载荷的增加, 计算点 ZNCC 系数均值呈现小幅度下降趋势, 分析认为这主要是因为试件变形造成了部分计算点的灰度变化。可见, 直接对试件 CT 的原始图片进行 DVC 计算, 所得的结果较差。因此接下来将会对原始图像进行预处理以提高 DVC 结果的准确性。

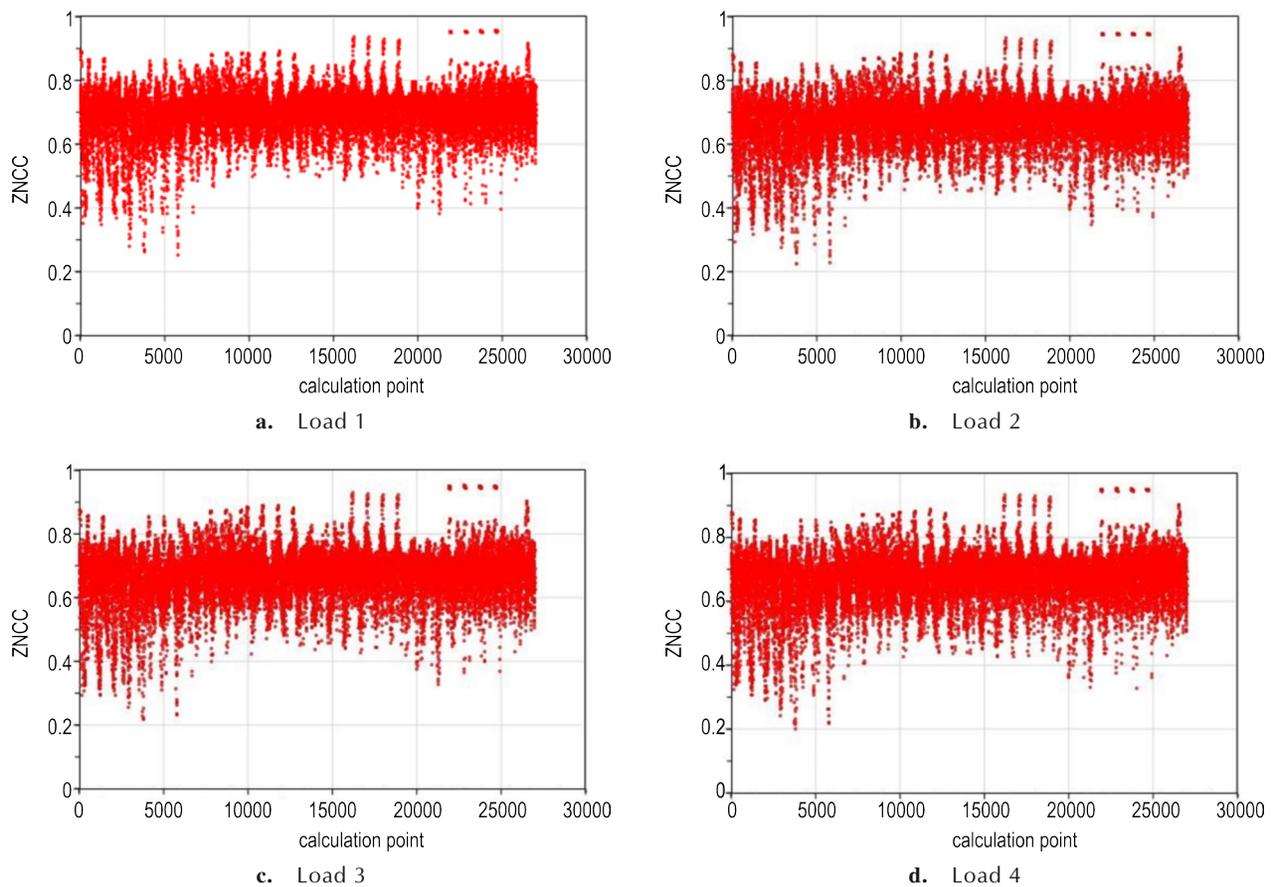


图2 采用原始CT体图像不同载荷下各计算点 ZNCC 系数分布情况

Fig.2 Distribution of ZNCC coefficient using original CT volume images under different loading states

在 DIC 测量中,操作者可在被测试样表面制作人工散斑图案以提供高对比度的变形信息载体。在绝大多数情况下,DVC 方法只能依赖被测物体内部的复杂成分或微结构体系在体图像中形成的灰度差异作为变形信息载体,因此体图像的质量对 DVC 的计算精度影响较大。相比于具有良好对比度的材料(如岩石、泡沫等)以及具有大量内含物的材料(如球墨铸铁、铝铜合金等),PBX 材料组分密度接近,内部纹理天然较弱。为了提高 DVC 的测量精度对图像进行处理,图 3 为预处理前后灰度分布直方图,图 4 为预处理前后试件体图像和切片图。由图 3a 可以看出,原始图像中大量体素点灰度值集中在 0~150,导致图像整体偏暗,难以辨别(图 4a)。为了解决这个问题,将灰度值大于 130 的体素点直接设为 0(这些点属于噪声点),然后将剩余体素点灰度值拉伸到 0~255,拉伸公式见式(1)。由图 4b 可知,实验试件内的灰度进行优化处理后,对比度有所提升,可以辨别试件内的颗粒边界。剩下 4 组变形体图像均进行类似操作。

$$\text{Imag } 0' = 255 * \frac{\text{Imag } 0}{\max(\text{Imag } 0)} \quad (1)$$

图 5 为实验试件内的灰度进行优化处理后,4 种不同载荷下各计算点 ZNCC 系数分布情况。由于 PBX 材料是脆性材料,在外载荷作用下,发生较小的变形即会断裂,故而图 5 中 ZNCC 系数分布大体一致。由图 5 可以看出各计算点 ZNCC 系数均得到提升,均值高于 0.75。这是因为作为变形信息载体的内部纹理的对比度提高,体图像的噪音大大降低,可见,预处理对于提升 DVC 计算精度具有较大的影响。

2.2 单轴压缩实验过程中的位移场

在进行 DVC 分析前,为了降低图像噪声对测量精度的影响,利用高斯滤波器(尺寸为 5×5×5,标准差为 1)对 4 组体图像进行高斯滤波^[18]。然后,在滤波后的参考体图像中心选取尺寸为 300 voxel×300 voxel×300 voxel 的感兴趣区域(Volume of Interest, VOI)。在 DVC 计算时,将每次加载获得的体图像(变形体图像)分别与加载前采集的体图像(参考体图像)进行匹配,采用 3D IC-GN 亚体素配准算法,最优收敛条件

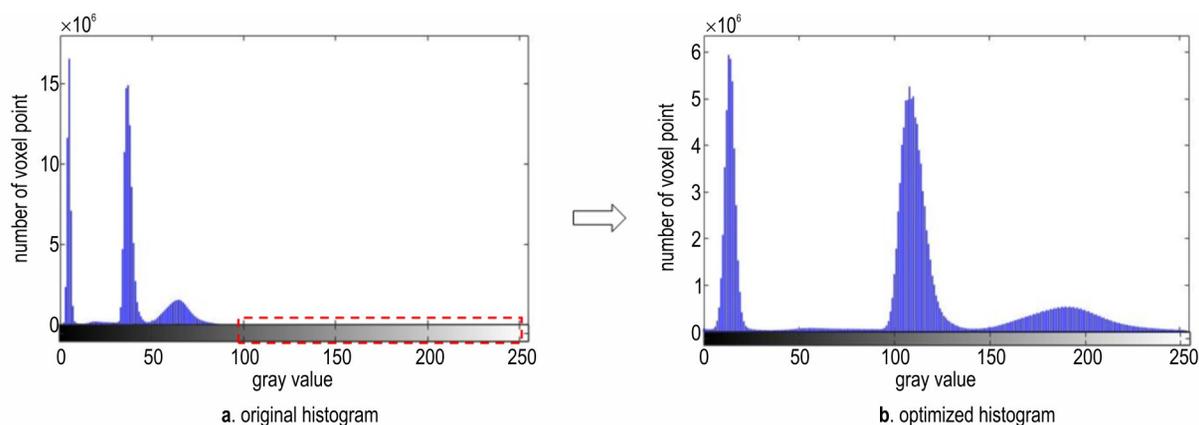


图3 实验试件体图像优化前后灰度分布直方图

Fig.3 Histograms of original CT image and optimized CT image

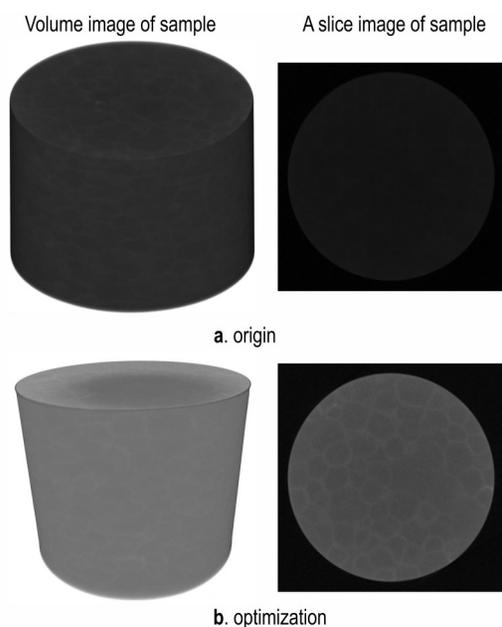


图4 优化前后的试件体图像和切片图

Fig.4 Comparison between original CT image and optimized CT image

为:位移矢量增量的模小于0.001 voxel或迭代次数不超过20次,子体块尺寸为41 voxel×41 voxel×41 voxel,计算步长为10 voxel,共有30×30×30=27000个均匀分布的计算点。在4种载荷下,DVC计算速度分别为8.31,8.02,7.31点/秒和6.45点/秒,可以看出试样变形越大,所需计算时间越长。

在4种载荷下,大部分计算点ZNCC系数较高,4种载荷下ZNCC系数均值分别为0.798,0.772,0.770和0.768,均在0.75以上,因此结果具有较高的可靠性;与此同时,随着载荷的增加,计算点ZNCC系数均值呈小幅度下降趋势,这主要是由于试件变形引起部分计算点灰度变化而引起的。为了保证计算结果的可靠性,需要将ZNCC系数较低的计算点剔除。根据计

算结果,将0.75设为ZNCC阈值,ZNCC低于该阈值的计算点将被剔除,这些点的位移结果(包括位移 u , v , w)将通过周围ZNCC系数高于0.75的计算点插值得到。在4种载荷下,ZNCC系数高于所设阈值的点分别为23325、19356、19356个和18497个,占总共27000个点的比例分别为86.3889%、71.6889%、70.0185%和68.5074%,均大于65%,因此计算结果具有较高的可靠性。

图6给出了在不同载荷下各计算点的 u 、 v 、 w 位移场。由图6可知,获得的位移场表现出极大的非均匀性,主要原因为试件内部结构各向异性;造型粉颗粒的尺寸及大小呈现非均匀分布,因此在加载过程中各点位移差别较大。与此同时,由图6可知,在载荷1下位移 u 的最大值和最小值分别为10.9906 voxel和9.0158 voxel,在载荷2下位移 u 的最大值和最小值为11.2879 voxel和7.8982 voxel,在载荷3下位移 u 的最大值和最小值为12.4122 voxel和7.8921 voxel,在载荷4下位移 u 的最大值和最小值为11.9612 voxel和8.0347 voxel。在4种载荷下,相对位移 u 而言,位移 v 值较小,其变化范围依次为[-2.6380 voxel, 0.1821 voxel]、[3.0077 voxel, 9.4698 voxel]、[3.2914 voxel, 9.3240 voxel]和[2.4368 voxel, 8.9796 voxel],这说明在加载过程中试件在 x 方向还存在滑移。相对于位移 u 、 v ,位移 w 的变化更加均匀,这主要是由于 z 方向是加载方向,各点变形比较大,结果信噪比较高。

2.3 应变应力结果的分析

研究通过对每次加载获得的变形体图像与参考体图像的灰度进行亚体素配准计算分析,获得了不同载荷下各计算点的 u 、 v 、 w 位移场,结果如图6所示。由

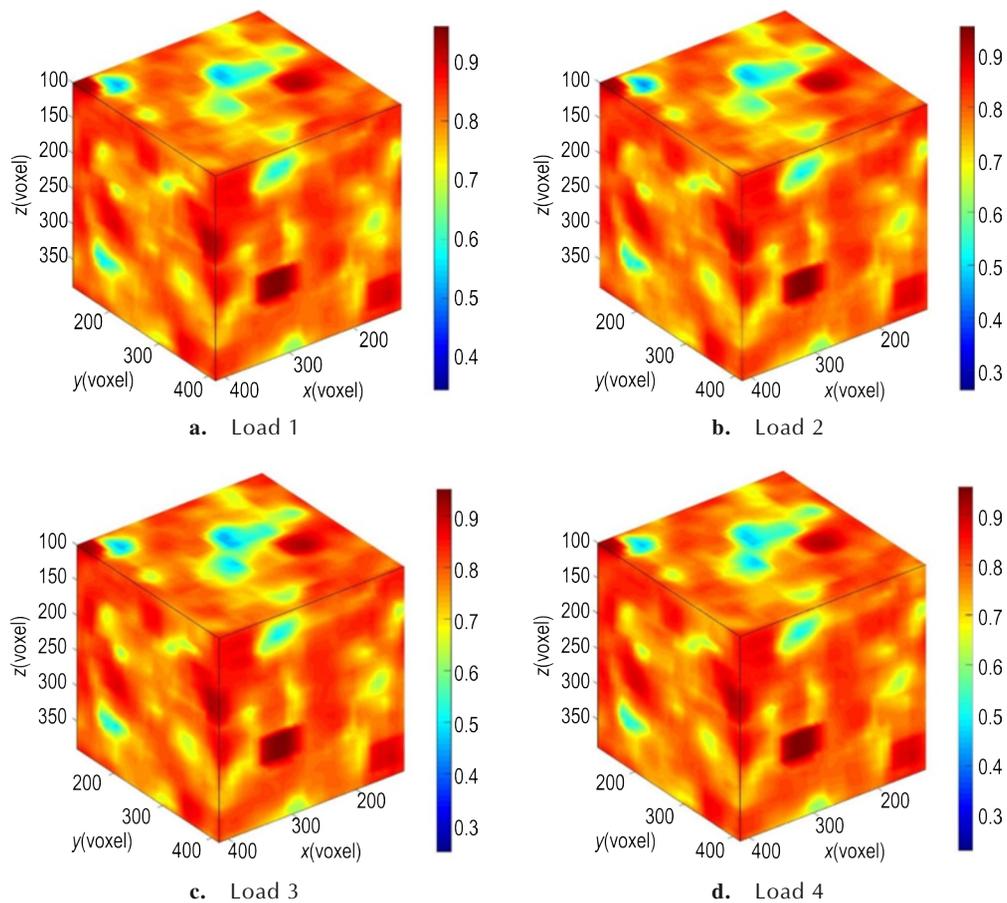


图5 不同载荷下各计算点 ZNCC 系数分布情况

Fig.5 Distribution of ZNCC coefficient of optimized CT images under different loading states

图6可以看出随着单轴压缩载荷的增加,感兴趣区域内的位移逐步增大,且由于非均匀材料体系特征,位移分布也体现出不均匀性。然而材料的力学性能由其受外载荷下的应力应变响应所反映,基于获得的三维位移场采用合适的差分算法即可获得应变场。

由于各种因素的影响,该三维位移场不可避免地包含噪声,因此本研究采用逐点局部小二乘拟合法计算各计算点的位移场,应变窗口大小为 $11 \times 11 \times 11$ 。由于应变计算时间较短,约为 5 s,因此不再给出具体的应变计算时间。为了更加直观地展示应变结果,结果如表1所示,试件内部6个应变分量($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$)在不同载荷下的平均值。

由表1可知,最大应变为单轴载荷方向 ϵ_{zz} ,当载荷稳定以后,从载荷2开始,平面内应变 $\epsilon_{xx} \approx \epsilon_{yy}$,3个切应变分量的变化较小,且均维持在较低水平。试件沿 x、y 方向的主应变相差不大,这说明试件沿压制面内的2个方向的力学性能差别较小,应变测量结果符合模压单向压缩成型的 PBX 材料的力学特征。

根据加载过程中的载荷力-位移关系,表2给出了每个加载步中应力-应变曲线的拟合直线,由表2可知,由载荷0状态到载荷1过程中,拟合直线的斜率为 532.25 MPa;从载荷1到载荷2,拟合直线的斜率为 649.13 MPa;从载荷2到载荷3,拟合直线的斜率为 1317.00 MPa;从载荷3到载荷4,拟合直线的斜率为 1372.30 MPa。

通过前期材料力学实验测得该种材料的弹性模量 E 为 729.60 MPa,泊松比 ν 为 0.368,通过对比本次原位压缩实验结果,可近似认为在载荷2之前材料均处于弹性阶段。为了更加直观地展示试件在压缩载荷下的变形情况,在载荷1和2下,通过胡克定律弹性本构关系,即可求得沿加载方向的弹性应力场 σ_{zz} 在试件内的分布^[1],见公式(2)。由于 TATB 基 PBX 材料本身是由尺寸、形状各异的造型粉颗粒压制而成,其结构的高度非均匀性导致试件在单轴压缩作用下的变形也是不均匀的。由于 TATB 基 PBX 材料含有随机分布的张开或闭合的初始损伤微裂纹,在材料只承受单向压缩载

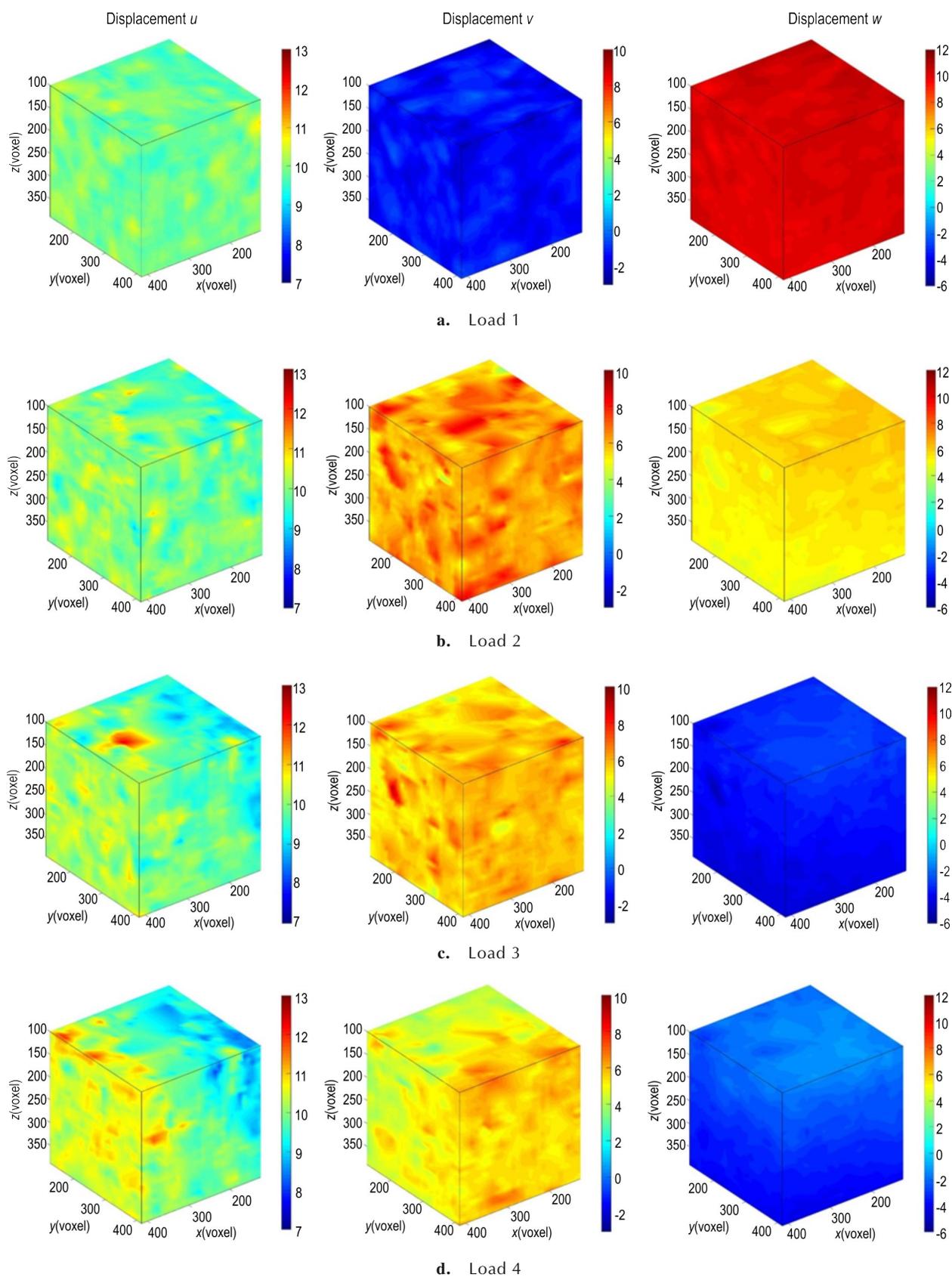


图6 不同载荷下位移场

Fig. 6 Displacement fields under different loading states

表 1 不同载荷下试件内部各应变分量平均值

Table 1 Mean value of strain component under different loading states

load	strain ϵ_{xx}	strain ϵ_{yy}	strain ϵ_{zz}	strain γ_{xy}	strain γ_{xz}	strain γ_{yz}
load1	1.9×10^{-4}	5.4×10^{-4}	-5.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	-5.1×10^{-4}	-6.9×10^{-4}
load2	1.1×10^{-3}	1.9×10^{-3}	-2.6×10^{-3}	3.9×10^{-4}	-6.8×10^{-4}	-8.9×10^{-5}
load3	2.4×10^{-3}	2.3×10^{-3}	-4.7×10^{-3}	5.1×10^{-4}	-4.0×10^{-4}	-1.6×10^{-5}
load4	3.9×10^{-3}	4.5×10^{-3}	-8.0×10^{-3}	-1.8×10^{-4}	2.4×10^{-4}	1.8×10^{-4}

表 2 不同载荷阶段应力应变线性拟合曲线

Table 2 Linear fitting curve of stress-strain relationship under different loading states

number	location	fitting line
1	(0.0102, 5.0989)	load 0-1: $\sigma_{zz}=532.25\epsilon_{zz}-0.3526$
2	(0.0212, 10.1927)	load 1-2: $\sigma_{zz}=649.13\epsilon_{zz}-3.4061$
3	(0.0262, 12.7341)	load 2-3: $\sigma_{zz}=1317.00\epsilon_{zz}-21.389$
4	(0.0314, 16.5547)	load 3-4: $\sigma_{zz}=1372.30\epsilon_{zz}-26.032$

荷时,由于其微结构的局部非均匀性,试件中存在局部的拉伸应力集中^[1]。而 TATB 基 PBX 材料的力学性能对拉伸载荷更为敏感,拉伸开裂是微裂纹激活和扩展的主要形式^[2]。为了揭示 TATB 基 PBX 材料的断裂机制,根据 DVC 算法获得的应变张量的 6 个分量,即可采用胡克定律对试件的应力分布进行分析。如图 7 所示,沿载荷方向的应力场(σ_{zz})分布中有局部拉应力集中现象,材料的损伤和破坏往往是由这些集中区域开始。值得注意的是,对 TATB 基 PBX 材料内部应力场的分析,还需要考虑材料物理性能的各向异性,借助于多轴非线性本构关系的发展,以更精确地揭示外载荷下 TATB 基 PBX 材料的变形非均匀性和破坏机理。

$$\sigma_{zz} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_{xx} + \frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \right] \quad (2)$$

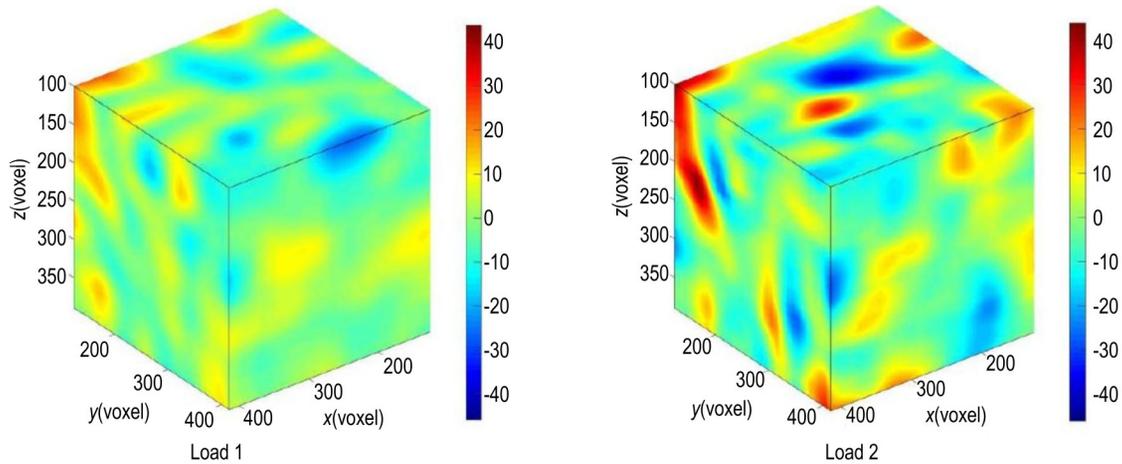


图 7 三维应力场 σ_{zz} (MPa) 弹性阶段

Fig.7 Stress distribution of σ_{zz} (MPa) during elastic state

2.4 基于 ZNCC 系数局部化的裂纹分析

受 μ -CT 设备分辨率的限制,在对内部裂纹的研究中,主要是观测大于 μ -CT 空间分辨率的裂隙。在裂纹萌生阶段,由于宽度较小,往往肉眼不可见,容易被忽略。小于 μ -CT 尺度的微裂纹难以从图像中直接观测,从而影响了裂纹孕育发展全过程的揭示。微裂纹的存在会使得采集到的参考体图像与变形体图像中的灰度局部不守恒,通过 DVC 方法分析获得的全局应变场分布中能够测得变形局部化区域,进而对低于 μ -CT 分辨率的微裂纹进行探测。通过应用数字图像相关方法的计算参数,如利用灰度残余分布、相关性系数、局部应变集中等参量,能够很好地对材料内部的损伤进行量化表征,如已有研究中对颗粒材料的应变场局部集中分布^[19],对奥氏体不锈钢材料的灰度残余局部集中

分布的量化分析^[20],均观测到了低于分辨率的微裂纹萌生,并对裂纹扩展和加宽后的方向与形貌进行了准确探测。

通过对图片进行判别,发现在载荷 4 下试件出现裂纹,裂纹处于试件边缘位置,为便于理解,图 8a 中给出了在 slice100 上裂纹的大概位置(图 8a 中黄框处)。为了研究 DVC 方法在裂纹识别中的有效性,在裂纹尖端附近选择一个大小为 40 voxel \times 80 voxel \times 60 voxel 的计算区域(图 8a 中红框处)。该计算区域如图 8b 所示, x 坐标的范围为 [450, 490], y 坐标的范围为 [300, 380], z 坐标的范围为 [70, 130]。采用 DVC 分析时子体块尺寸为 21 voxel \times 21 voxel \times 21 voxel,步长为 2 voxel,其他设置与前文一致。图 8c 给出了该计算区域内的 ZNCC 系数分布图,由图 8c 可知,在裂纹附

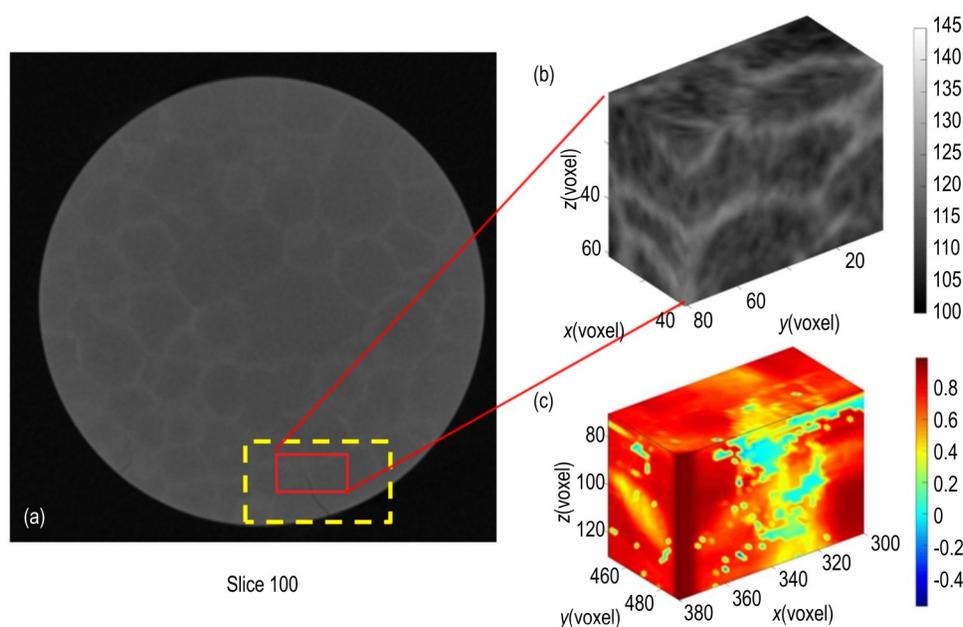


图8 基于DVC计算ZNCC系数分布的内部微裂纹分析:(a)边缘开裂的CT灰度切片图,(b)裂纹尖端的红框区域体图像,(c)红框区域内的ZNCC系数分布图

Fig.8 Internal microcrack detection based on the distribution of ZNCC coefficient from DVC calculation: (a) a slice image of sample with a crack initiated from edge, (b) CT image of crack tip region indicated by red box, (c) distribution of ZNCC coefficient of crack tip region indicated by red box

近,ZNCC系数普遍偏低,这主要是由于在裂纹附近试件发生较大的变形,从而引起匹配失效。在CT体图像分辨率不足的位置,明显可见ZNCC系数局部化,即通过DVC计算的ZNCC系数分布图,可以简单、高效地判定亚体素微裂纹位置在试件内部的分布。

3 结论

在TATB基PBX材料单轴压缩实验中,通过DVC方法分析不同载荷下试件三维体图像,获得了加载过程试件内部变形场的演化情况。研究表明:

(1) 在DVC计算前对原始图像进行灰度直方图拉伸,经体图像优化,材料在4种载荷下的ZNCC系数均值在0.75以上,DVC计算结果具有较高的可靠性。

(2) 压缩过程中随着载荷的增加,试件发生较大的压缩变形,断裂前达到了0.8%压缩应变。但是由于试件的颗粒体系的材料不均匀性,使其内部三维变形场也呈现出一定的不均匀性。

(3) 将ZNCC系数分布图应用于试件内部微裂纹的识别,能够简单、高效地确定小于 μ -CT尺度的微裂纹分布情况。

参考文献:

- [1] PALMER S, FIELD J, and HUNTLEY J. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1993, 440:399-419.
- [2] RAE P J, PALMER S, GOLDREIN H, 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: 2227-2242.
- [3] ELLIS K, LEPPARD C, and RADESK H. Mechanical properties and damage evaluation of a UK PBX [J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40: 6241-6248.
- [4] 兰琼,韩超,雍炼,张明. 低压热处理对PBX炸药件密度及内部质量的影响 [J]. *含能材料*, 2008, 16(2):185-187.
LAN Qiong, HAN Chao, Yong Lian, ZHANG Ming. Effects of low-pressure heat treatment on charge density and inner quality of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2):185-187.
- [5] 李敬明,温茂萍,黄毅民. 热循环对TATB基高聚物黏结炸药性能的影响研究 [J]. *含能材料*, 2005, 13(8):208-210.
LI Jing-ming, WEN Mao-ping, HUANG Yi-min. Effect of thermal cycling test on the properties of TATB based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(8):208-210.
- [6] 徐尧,王虹,李建,等. 中子衍射法测量TATB基PBX单轴压缩的内应力研究 [J]. *含能材料*, 2017, 25(10):860-865.
XU Yao, WANG Hong, LI Jian, et al. Internal stress measurement during uniaxial compression for TATB based PBX by neutron diffraction [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(10):860-865.

- [7] 李明, 张珏, 温茂萍, 等. 数字散斑相关技术及其应用 [J]. 信息与电子工程, 2005, 3(1): 36-39.
LI Ming, ZHANG Jue, WEN Mao-ping, et al. Digital speckle correlation and its applications [J]. *Information and electronic engineering*, 2005, 3(1): 36-39.
- [8] WANG Yan-jun, CHARBAL A, DUFOUR J-E, et al. Hybrid multiview correlation for measuring and monitoring thermomechanical fatigue test [J]. *Experimental Mechanics*, 2020, 60(1):13-33.
- [9] 潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展 [J]. 科学通报, 2017, 62: 1671-1681.
PAN Bing, WANG Bo. Research progress in digital volume correlation method (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62: 1671-1681.
- [10] PARAB N, ROBERTS Z, HARRA M, et al. High speed X-ray phase contrast imaging of energetic composites under dynamic compression [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 131903.
- [11] HILD F, FANGET A, ADRIEN J, et al. Three-dimensional analysis of a tensile test on a propellant with digital volume correlation [J]. *Archives of Mechanics*, 2011, 63(5-6):459-478.
- [12] SJODAHL M, SIVIOUR C, FORSBERG F. Digital volume correlation applied to compaction of granular materials [J]. *Procedia IUTAM*, 2012, 4: 179-195.
- [13] HU Zhen-xing, LUO Hui-yang, BARDENHAGEN G, et al. Internal deformation measurement of polymer bonded sugar in compression by DVC of In-situ tomography [J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 55(1): 289-300.
- [14] HU Zhen-xing, DU Ying-jie, LUO Hui-yang, et al. Internal deformation measurement and force chain characterization of Mason sand under confined compression using incremental DVC [J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54: 1575-1586.
- [15] WANG Bo, PAN Bing. Incremental digital volume correlation method with nearest subvolume offset: An accurate and simple approach for large deformation measurement [J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 116: 80-88.
- [16] 潘兵, 吴大方, 郭保桥. 数字体图像相关方法中基于迭代最小二乘法的物体内部变形测量 [J]. 实验力学, 2011, 26(6): 665-673.
PAN Bing, WU Da-fang, GUO Bao-qiao. Digital volume image correlation by using iterative least-squares for internal deformation measurement [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(6): 665-673.
- [17] PAN Bing, WANG Bo. A flexible and accurate digital volume correlation method applicable to high-resolution volumetric images [J]. *Measurement Science & Technology*, 2017, 28(10): 105007.
- [18] 邹翔, 潘兵, 王延珺, 等. 高斯预滤波对数字体图像相关测量影响的实验研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(15): 2.
ZOU Xiang, PAN Bing, WANG Yan-jun, et al. Study on Influence the effect of volumetric image Gaussian prefiltering on digital volume correlation measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 2.
- [19] XU Feng. Quantitative characterization of deformation and damage process by digital volume correlation: A review [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2018, 8(2): 83-96.
- [20] WANG Yan-jun, CHARBAL Ali, HILD François, et al. Crack initiation and propagation under thermal fatigue of austenitic stainless steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 124: 149-166.

3D Deformation Measurement in TATB Based PBX Based on Digital Volume Correlation With μ -Computed Tomography

WANG Yan-jun¹, ZOU Xiang², PAN bing², GUO Yu-chen¹, LIU Chen¹, HAN Chao¹, LV Ke-zhen¹

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to accurately understand the mechanical characteristic of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB)-based polymer bonded explosive (PBX) under compressive loading, an in-situ measurement technique based on micro X-ray computed tomography (μ -CT) imaging and digital volume correlation (DVC) was proposed. The in-situ scanning for TATB based PBX sample under uniaxial compression was carried out by using μ -CT and the three-dimensional digital volume images of the samples under different loading were obtained. Then, two sets of digital volume images obtained before and after loading respectively were analyzed by using local DVC method based on the Inverse Compositional Gauss-Newton (IC-GN) algorithm and the three-dimensional internal displacement and strain fields with sub-voxel accuracy were obtained. The internal stress fields were finally rebuilt according to the elastic Hook's rule. The results show that the generation and development process of the strain localization zone inside the sample could be directly revealed based on the internal measurement technique combining DVC and μ -CT. In addition, the Zero-mean Normalized Cross-Correlation (ZNCC) coefficients are commonly lower at the microcracks. In practical applications, the location of sub-voxel microcracks could be identified by the distribution of ZNCC coefficients.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); digital volume correlation (DVC); 3D internal deformation measurement

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021267

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 11502251), CAEP Foundation (Grant No.CX2019012)

(责编: 王馨逸)