

# 基于CT的数字体散斑法测量物体内部三维变形场

毛灵涛<sup>1,2</sup> Fu-pen Chiang<sup>2</sup> 袁则循<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

<sup>2</sup>纽约州立大学石溪分校机械系, 纽约 11794-2300

<sup>3</sup>中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083

**摘要** 提出了用于测量物体内部三维变形场的数字体散斑(DVSP)法。利用计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MRI)、激光扫描共焦显微镜(LSCM)或光学相干断层成像术(OCT)获取具有散斑特征的物体变形前后的三维立体图像,将其分别分割成若干具有相同尺寸的子块体,对相对应的子块体进行第一步三维快速傅里叶变换,在频谱域进行数值干涉得到合成谱,对合成谱进行第二步三维快速傅里叶变换,得到含位移信息的扩展脉冲函数,通过求取峰值位置得到子块体的位移矢量,对所有变形前后相对应的子块体逐一进行上述两步三维快速傅里叶变换,就可以求出所有子块体的位移矢量,从而获得物体内部三维变形场。利用模拟生成的三维散斑体图像,通过数字实验,分析了散斑尺寸、数目、子块体尺寸、图像对比度和亮度对DVSP法精度与准确性的影响。利用DVSP法测量了红砂岩单轴压缩内部的三维应变场,由位移场及应变场分布可直观地揭示试件内部变形特征。

**关键词** 测量;数字体散斑;二步三维快速傅里叶变换;三维变形场;工业计算机断层扫描

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0312001

## Three-Dimensional Displacement Measurement in Solid Using Digital Volumetric Speckle Photography Based on Computer Tomography

Mao Lingtao<sup>1,2</sup> Chiang Fu-pen<sup>2</sup> Yuan Zexun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Stony Brook, New York, 11794-2300, USA

<sup>3</sup>School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract** Digital volumetric speckle photography (DVSP) technique is proposed to measure three dimensional displacement in solid object. Using computer tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), laser-scanning confocal microscopy (LSCM) or optical coherence tomography (OCT), three dimensional volumetric images of an object with speckle characteristics before and after deformation are obtained. These three dimensional images are divided into subsets with a certain voxel array and comparable. Afterwards three-dimensional fast Fourier transform (3D-FFT) is applied to a corresponding pair of subsets. A new resultant spectrum can be constructed by a numerical interference from the two procured spectra at the spectral domain. Then another step of 3D-FFT is performed on the resultant spectrum resulting an expanded impulse function whose displacement vector experienced by the speckles contained in the original subset as a whole. This process is carried out for every corresponding pair of subsets. By detecting the position of the crests of these impulse functions, an array of displacement vectors at all every subset is obtained and the 3D displacement fields are mapped. Using simulated 3D speckle volume images, the influences of speckle size, number, subset size, image contrast and image brightness on the accuracy and precision of DVSP are analyzed

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-09-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51374211)、国家973计划(2010CB732002)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240803)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009QM02)

**作者简介:** 毛灵涛(1974—),男,副教授,主要从事光测实验力学方面的研究。E-mail: mlt@cumt.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

by digital experiments. We apply the DVSP technique to measure the internal 3D deformation field of red sandstone sample under uniaxial compression, and the resulting displacement and deformation field contours clearly indicate the damage characters of the sample.

**Key words** measurement; digital volumetric speckle; two-step three-dimensional fast Fourier transform; three-dimensional displacement field; industrial computer tomography

**OCIS codes** 120.3940; 100.2960; 340.7440; 110.6960

## 1 引 言

数字图像相关法(DIC)利用图像相关技术测量物体表面变形,是一种应用广泛的实验力学方法<sup>[1-5]</sup>。随着计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MRI)、激光扫描共焦显微术(LSCM)和光学相干断层成像术(OCT)<sup>[6]</sup>的出现与应用,为物体内部三维(3D)变形场测量提供了图像获取的新手段,能够获取物体内部结构图像。1999年,Bay等<sup>[7]</sup>将二维数字图像相关法拓展用于三维位移场及应变场测量,提出了基于CT技术的数字体图像相关法(DVC),并用该方法得到松质骨受载下的内部位移场,通过数值微分获取其内部应变场。之后,国外许多学者针对DVC原理及应用进行了大量的研究,对木材<sup>[8]</sup>、泥岩<sup>[9]</sup>、砂土<sup>[10]</sup>、固体泡沫<sup>[11]</sup>及铸铁<sup>[12]</sup>等材料在不同载荷条件下的位移场和应变场进行了研究;国内许多学者在算法方面也进行了一些研究<sup>[13-15]</sup>。Huang等<sup>[16]</sup>在研究DVC算法的基础上,结合LSCM对软凝胶体的内部变形进行了研究。从二维到三维,计算量大为增加,如何提高计算效率将是DVC方法研究的一个重点内容。

与数字图像相关法同期发展的数字散斑法(DSP)是将二维激光散斑测量全场分析的过程进行数字化,通过两步快速傅里叶变换(FFT)实现全场位移分析<sup>[17-19]</sup>。数字图像相关法是在空间域中直接从物体表面的人工散斑场或天然结构形成的散斑场中提取变形信息,避免了传统的激光散斑法利用干涉条纹提取信息的不便,其测量精度和灵敏度不受条纹对比度的影响;而数字散斑法,其实质是利用傅里叶变换在频率域进行相关运算,相比较空间域匹配搜索,其具有更快的搜索速度<sup>[18,20]</sup>。虽然数字图像相关法与数字散斑法在数学上可以相互推导,都是通过相关性来搜索变形信息,但两个方法起源不同,物理含义也有所差异<sup>[21]</sup>。

本文基于数字散斑法算法,将其拓展到测量物体内部的三维变形场,提出采用两步三维傅里叶变换的数字体散斑法(DVSP),通过数字实验方法分析散斑结构特征对其精度的影响,利用该方法测量红砂岩单轴压缩内部变形场。

## 2 DVSP的基本原理

利用CT或MRI等设备获取物体变形前后的体图像,分别定义为参考体图像和变形体图像,相对于平面图像单位为像素(pixel),体图像的单位为体素(voxel)。将参考体图像与变形体图像分成若干大小,如32 voxel×32 voxel×32 voxel的子块体(subset),相对应的子块体构成一个“斑对”, $h_1(x,y,z)$ 和 $h_2(x,y,z)$ 分别表示变形前后相应子块体的光学复振幅,则有

$$h_2(x,y,z) = h_1[x - u(x,y,z), y - v(x,y,z), z - w(x,y,z)], \quad (1)$$

式中 $u, v, w$ 分别为子块体在 $x, y, z$ 三个方向上的位移。对变形前后的子块体分别进行第一步三维傅里叶变换,则有

$$\begin{aligned} H_1(f_x, f_y, f_z) &= \mathcal{F}\{h_1(x, y, z)\}, \\ H_2(f_x, f_y, f_z) &= \mathcal{F}\{h_2(x, y, z)\}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $f_x, f_y, f_z$ 分别为 $x, y, z$ 三个方向上的频率, $H_1(f_x, f_y, f_z)$ 为 $h_1(x, y, z)$ 的傅里叶变换函数, $H_2(f_x, f_y, f_z)$ 为 $h_2(x, y, z)$ 的傅里叶变换函数, $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换。在频率域中,对上述两个三维散斑体进行数值干涉,即通过数值方式模拟散斑体干涉结果:

$$F(f_x, f_y, f_z) = \frac{H_1(f_x, f_y, f_z) H_2^*(f_x, f_y, f_z)}{\sqrt{|H_1(f_x, f_y, f_z) H_2(f_x, f_y, f_z)|}} = |H_1(f_x, f_y, f_z)| \exp\{j[\phi_1(f_x, f_y, f_z) - \phi_2(f_x, f_y, f_z)]\}, \quad (3)$$

式中  $\phi_1(f_x, f_y, f_z)$  和  $\phi_2(f_x, f_y, f_z)$  分别为  $H_1(f_x, f_y, f_z)$  和  $H_2(f_x, f_y, f_z)$  的相位角。(3)式实质是一个频率域中的纯相位滤波器(POF)<sup>[22]</sup>。由相位差与光程差之间的关系则有

$$\phi_1(f_x, f_y, f_z) - \phi_2(f_x, f_y, f_z) = 2\pi(uf_x + vf_y + wf_z). \quad (4)$$

对(3)式进行第二步傅里叶变换,有

$$G(\xi, \eta, \zeta) = \mathcal{F}\{F(f_x, f_y, f_z)\} = \bar{G}(\xi - u, \eta - v, \zeta - w), \quad (5)$$

式中  $\bar{G}(\xi - u, \eta - v, \zeta - w)$  表示在第二步傅里叶变换后的频率域  $(\xi, \eta, \zeta)$  中,峰值位于  $(u, v, w)$  的点扩展脉冲函数。对所有子块体形成的“斑对”进行上述两步傅里叶变换。通过求解脉冲函数的峰值点,就可以得到每一对子块体的位移矢量,图1为 DVSP 算法示意图。由于数字体图像的离散特性,由(5)式得到的位移值为整体素值。为了获得更高的精度,可进行亚体素精度插值。围绕着极值点所处整体素坐标点,选择  $3 \text{ voxel} \times 3 \text{ voxel} \times 3 \text{ voxel}$  的矩阵,可利用三维线性、样条或三次插值来获得亚体素精度。本文采用三次样条插值方法获取亚体素精度。在采用 Matlab 编写上述程序时,直接采用软件提供的 `interp3()` 函数对围绕峰值点的  $3 \text{ voxel} \times 3 \text{ voxel} \times 3 \text{ voxel}$  的矩阵进行插值,插值参数选为 `spline`,即为三次样条插值。在获得变形场后,采用适当的变形与应变的关系,就可以进一步求解应变张量,本文采用文献[15]提出的局部最小二乘拟合的方法获得应变场。

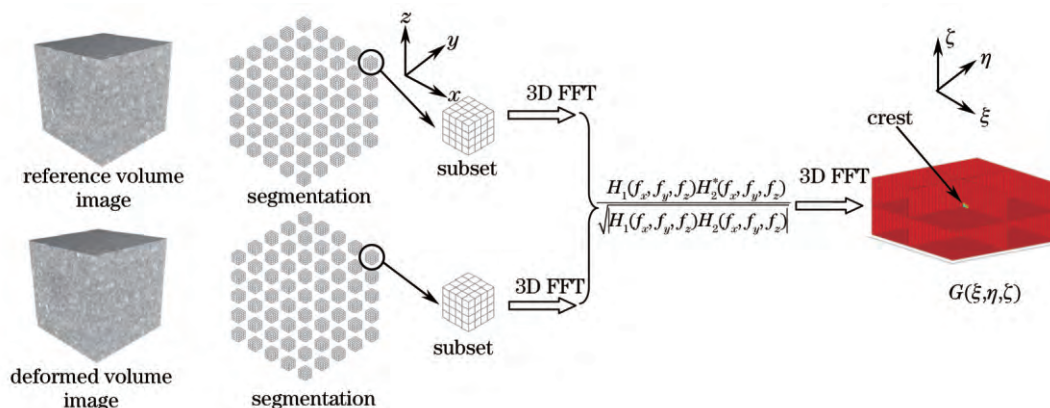


图1 DVSP处理算法示意图

Fig.1 Schematic demonstrating the processing algorithm of DVSP

### 3 DVSP精度影响因素分析

#### 3.1 计算机仿真三维散斑体图像

为了避免图像获取过程中噪声及不定因素的影响,采用计算机仿真三维散斑体图像来研究 DVSP 法的测量精度<sup>[15]</sup>。散斑体图像的数学函数为

$$I_r(x, y, z) = \text{int} \left\{ \sum_{k=1}^N I_k^0 \exp \left[ -\frac{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2 + (z-z_k)^2}{R^2} \right] \right\}, \quad (6)$$

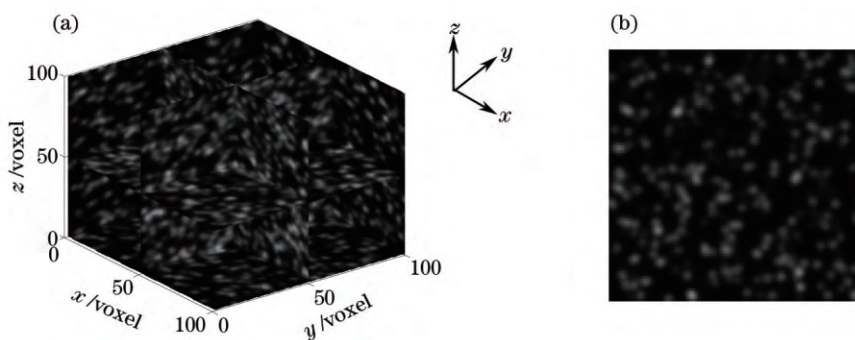


图2 计算机模拟三维散斑。(a)体图像;(b)截面图

Fig.2 Computer-simulated 3D speckle patterns. (a) Volumetric image; (b) section image



式中  $\text{int}$  为取整函数,  $N$  为散斑颗粒的数量,  $I_k^0$  为第  $k$  个散斑颗粒中心的随机光强分布,  $R$  为空间散斑颗粒的半径,  $(x_k, y_k, z_k)$  是第  $k$  个散斑中心坐标, 图像采用 8-bit 灰度图。图 2 为生成的体图像与一幅  $xy$  面的截面图, 体图像大小为  $100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel}$ , 随机分布 12000 个散斑颗粒, 颗粒半径  $R=2.0 \text{ voxel}$ 。变形体图像通过傅里叶相移原理由参考体图像生成, 沿  $z$  轴方向平移参考体图像, 平移量从  $0.1 \sim 1.0 \text{ voxel}$ , 间隔为  $0.1 \text{ voxel}$ , 共生成 10 个具有亚体素平移的变形体图像。利用生成的参考体图像与变形体图像分别讨论散斑颗粒大小、散斑数量、子块体大小、图像对比度和亮度对 DVSP 法性能的影响。

### 3.2 散斑颗粒的大小

由 (6) 式分别生成散斑颗粒半径  $R$  为  $0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 2.0 \text{ voxel}$  的三维散斑体图像作为参考体图像, 散斑数量都为 12000。由参考体图像, 通过傅里叶相移生成具有不同亚体素位移的变形体图像, 利用 DVSP 法计算位移值。以下如无说明, 体图像的尺寸为  $100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel}$ , 计算时采用的子块体尺寸均为  $32 \text{ voxel} \times 32 \text{ voxel} \times 32 \text{ voxel}$ , 子块体平移距离为  $16 \text{ voxel}$ 。利用统计学中的平均误差与标准偏差进行对比分析, 平均误差为

$$w_e = w_{\text{mean}} - w_{\text{imp}}, \quad (7)$$

式中  $w_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^H w_{ijk} / (L \times W \times H)$  为计算区域的平均位移值,  $w_{ijk}$  为第  $(i, j, k)$  个计算点的测量值, 计算结果构成的三维数组大小为  $L \times W \times H$ ,  $w_{\text{imp}}$  为虚加的刚体位移。

标准偏差为

$$\sigma_w = \sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^H (w_{ijk} - w_{\text{mean}})^2 / (L \times W \times H - 1)}. \quad (8)$$

图 3(a), (b) 分别为平均误差与标准偏差随亚体素位移变化的情况。除颗粒尺寸  $R=2.0 \text{ voxel}$  外, 其余 6 个尺寸散斑图计算所得平均误差随着亚体素位移都呈近似正弦分布, 这种误差分布形式是由于亚体素插值算法引起的<sup>[23]</sup>。当  $R=2.0 \text{ voxel}$  时, 平均误差分布已偏离了正弦分布形式, 说明再继续增加散斑颗粒尺寸, 误差会进一步增大。随着散斑颗粒尺寸的增大, 平均误差的幅值分布先减小后增加。当  $R=1.2 \text{ voxel}$  时, 平均误差幅值为  $0.041 \text{ voxel}$ ; 标准偏差最大值也随颗粒尺寸的增大先减小后增加。当  $R=0.08 \text{ voxel}$  时, 平均误差幅值最小, 为  $0.006 \text{ voxel}$ 。综合考虑平均误差幅值与标准偏差最大值, 用两者之和来评价测量的精准度, 对应  $R=1.0 \text{ voxel}$  和  $R=1.2 \text{ voxel}$  时, 该值最小, 均为  $0.049 \text{ voxel}$ 。上述分析说明, 选择一定尺寸的子块体计算时, 散斑颗粒尺寸有一个最佳值, 处于该值时, DVSP 法计算精准度最好。

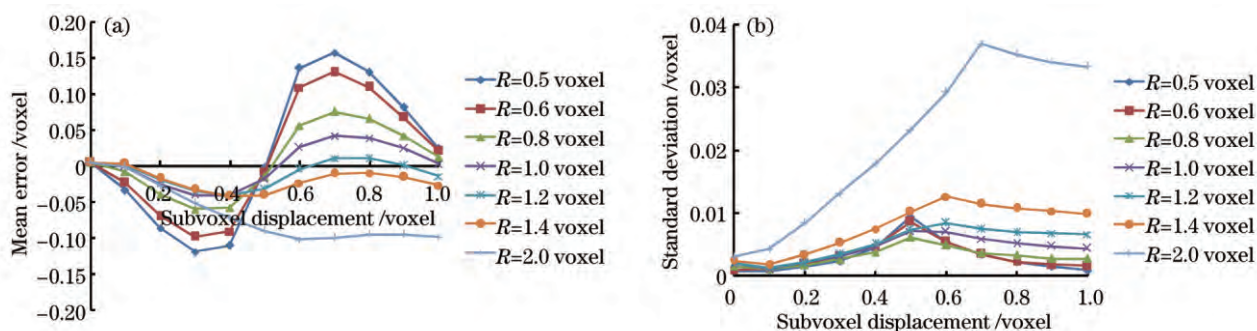


图 3 不同散斑尺寸引起的 DVSP 测量误差。(a) 平均误差; (b) 标准偏差

Fig.3 Measurement error of DVSP caused by different radii. (a) Mean error; (b) standard deviation

### 3.3 散斑颗粒的数目

生成一系列散斑颗粒的数目  $N$  为  $100 \sim 20000$  的参考体图像, 散斑颗粒的半径  $R$  为  $1.0 \text{ voxel}$ , 通过傅里叶相移生成相应的虚加亚体素平移的变形体图像。图 4(a) 给出了随着每个子块体散斑颗粒数目的增加, 平均误差幅值和标准偏差最大值的变化情况。散斑数目的增加对标准偏差的影响较大, 即对测量准确度影响较大。随着散斑颗粒数目的增加, 标准偏差最大值一开始迅速减小, 当散斑颗粒数目增加到一定值时, 减小的速度开始放缓, 可以预计最终将趋于一个定值; 平均误差幅值随散斑颗粒数目的增加变化幅度不大, 但总体

有减少的趋势。图4(b)为颗粒数目的增加,平均误差幅值与标准偏差最大值之和的分布,对其进行分段线性拟合,可以得出两直线交点A,其对应的子块体内颗粒数目约为10,说明要保证DVSP的计算精度与准确性,每个子块体内散斑颗粒数目应大于10。

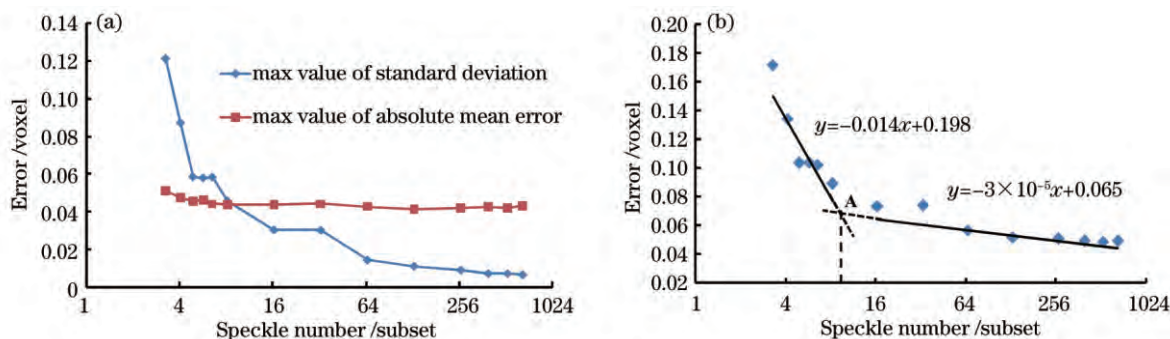


图4 不同散斑数量引起的DVSP的测量误差(a)误差最大值变化曲线;(b)误差分布及拟合

Fig.4 Measurement error of DVSP versus speckle number. (a) Curves of maximum error; (b) error distribution and fitting results

### 3.4 子块体的尺寸

模拟体图像的散斑半径  $R$  为 1.0 voxel, 数量为 12000。子块体的尺寸分别采用 8 voxel×8 voxel×8 voxel, 16 voxel×16 voxel×16 voxel 和 32 voxel×32 voxel×32 voxel, 相应的子块体平移距离分别为 4, 8, 16 voxel。计算结果如图 5 所示。随着子块体尺寸的增大, 平均误差与标准偏差都降低, DVSP 的精度与准确度也有所提高。当子块体为 8 voxel×8 voxel×8 voxel 时, 平均每个子块体里含散斑颗粒的个数为 6, 不满足上述保证 DVSP 计算准确度时颗粒数要多于 10 个的要求, 因此计算结果误差较大。在实际实验中, 试件内部存在变形, 子块体尺寸过大, 斑对的相关性就会减弱, 影响测量结果, 所以子块体的尺寸应在保证精度的前提下尽量选小尺寸。

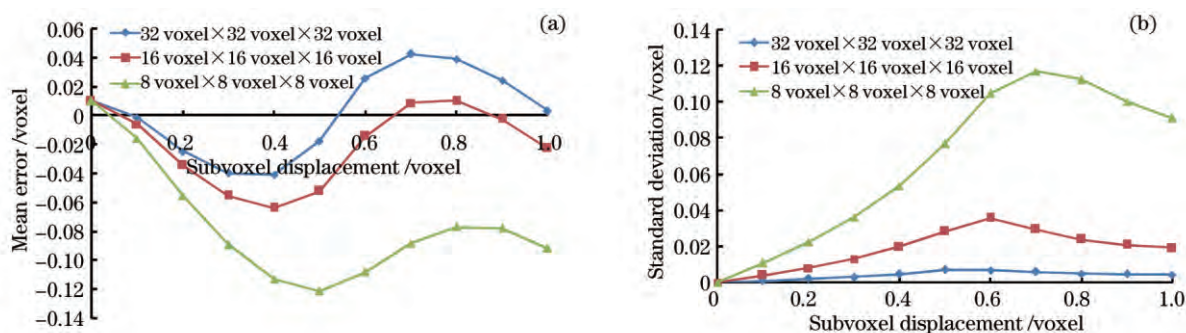


图5 不同子块体尺寸影响的比较。(a)平均误差;(b)标准偏差

Fig.5 Comparison among different subset sizes. (a) Mean error; (b) standard deviation

### 3.5 图像对比度与亮度

为了分析图像对比度与亮度对 DVSP 法的影响, 以散斑半径  $R$  为 2.0 voxel, 数量为 12000 的模拟体图像

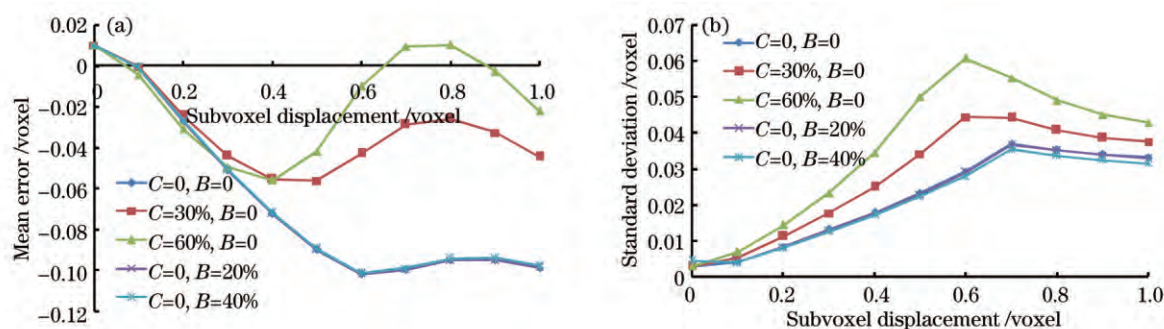


图6 图像对比度与亮度的影响。(a)平均误差;(b)标准偏差

Fig.6 Influence of different contrasts and brightness. (a) Mean error; (b) standard deviation



作为研究对象,同时改变参考体图像和变形体图像的对比度和亮度,计算结果如图6所示。图中 $C$ 表示对比度, $B$ 表示亮度。可以看出,随着图像对比度的增加,平均误差的分布又恢复了正弦变化,幅值减小,但标准偏差有所增加,平均误差幅值与标准偏差最大值之和呈减小趋势,说明随着对比度的增加,可以在一定程度上提高测量的精度。当提高图像的对比度时,将使散斑灰度值分布更加尖锐,实质上是减小了散斑的尺寸,提高了测量的精度,这与上述散斑尺寸的影响分析是一致的。单纯改变图像的亮度,对测量结果几乎没有影响。

上述只是单因素分析讨论了散斑尺寸、数量、子块体尺寸、图像对比度和亮度对DVSP法精度的影响,在实际测量计算中,应综合考虑这些因素的影响,选择合适的参数进行计算分析。

## 4 红砂岩单轴压缩的变形测量

### 4.1 实验设备

实验中的CT扫描设备为BIR公司的ACTIS300-320/225工业CT,其中光源为YXLON 225kV的微焦点X射线源,探测器为PerkinElmer的XRD 0822AP 14型平板探测器,尺寸为1024 pixel×1024 pixel,每个像素的大小为200  $\mu\text{m}$ ×200  $\mu\text{m}$ 。图7(a)为系统的基本原理图,X射线穿过被测物体,由探测器接收衰减后的信号,试件在扫描过程中做360°旋转,每隔0.5°由探测器采集试件的投影图像,通过数学变换获得对应试件截面的一系列二维重构图像,如图7(b)所示。设备中的X射线为锥束,将试件投影到平板探测器上时,探测器每一行像素按照光学几何放大比率对应着一定厚度的试件,当光源、试件和探测器距离都确定后,每一行像素对应的实际厚度也就确定了,因此,二维重构得到的每层CT图像都具有一定厚度 $h$ ,如图7(c)所示。具有厚度的每个像素称为体素,则厚度尺寸最小值 $h_{\min}$ 就是投影图中每行像素对应的实际尺寸。在重建二维图像时,可以选择单行数据或多行数据重建。单行数据重建时,每层图像对应的厚度即为 $h_{\min}$ ;采用多行数据重建可以减小噪声的影响,提高成像质量,此时,每层图像对应厚度为行数与 $h_{\min}$ 的乘积。本文实验中扫描重构都选用单行数据重建。由一系列二维CT图像可得到图7(d)所示试件的三维数字体图像。CT的定量描述是CT数,将CT数按一定的线性比例转换为灰度值即为CT图像,所以CT图像近似反映了物质内部密度的变化,物质内部不同结构或成份在CT图像中显示为不同的灰度值,这种天然结构可以作为散斑结构,携带变形信息。

为了实现加载过程中对试件进行原位扫描,设计了与CT配套的加载装置。在实验过程中,该装置放置在转台上并与转台一起旋转。加载腔采用聚碳酸酯材料,以减小射线能量的损失。装置采用步进电机实施加载,加载速度为0.18 mm/min,配有压力传感器读取压力数值,采用光栅尺读取上加载压头的位移。图8所示为工业CT系统及加载装置实物图。

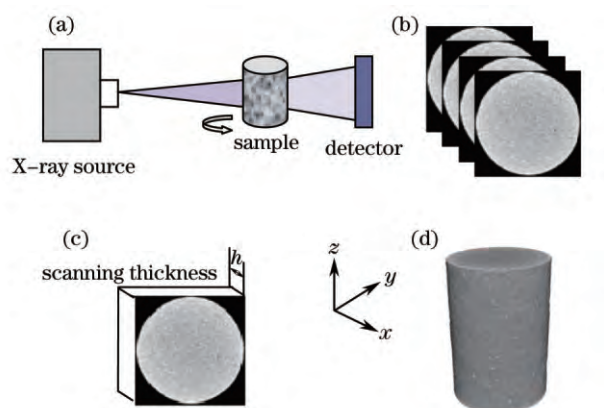


图7 (a)工业CT原理图; (b) CT序列图像; (c)一层CT图像; (d)数字体图像

Fig.7 (a) Schematic of CT principle; (b) CT series images; (c) one slice of CT images; (d) digital volumetric image

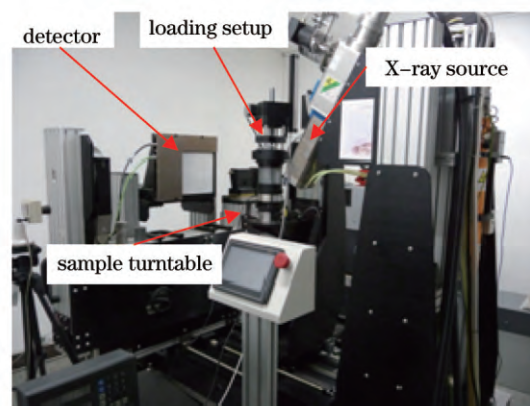


图8 工业CT系统及加载装置实物图

Fig.8 Industrial CT system and loading setup

## 4.2 实验过程及结果

红砂岩试件尺寸为 $\Phi 25 \times 50$  mm,将试件置于自制的单轴加载装置中,一起放置在载物转台上,分8步进行加载,载荷分别为0、2.17、4.27、6.09、7.97、10.19、11.98 MPa,在第8步,试件破坏。每一步中,保持载荷,对试件进行原位扫描,获得相应的体图像,以第1步的体图像为参考体图像,其他各阶段体图像为变形体图像,分别应用DVSP法计算得到各阶段试件内部的变形,其中体图像尺寸为 $566 \text{ voxel} \times 566 \text{ voxel} \times 801 \text{ voxel}$ ,子块体尺寸为 $64 \text{ voxel} \times 64 \text{ voxel} \times 64 \text{ voxel}$ ,平移距离为 $32 \text{ voxel}$ , $1 \text{ voxel}$ 对应的实际尺寸为 $45 \mu\text{m}^3$ 。限于篇幅,本文仅给出部分结果。图9为试件破坏前的第7步和第8步破坏后沿 $x=12.5$  mm处剖面的灰度图像,从灰度图像上很难辨识试件内部可能已产生的细微裂隙。图10为第6步及第7步试件 $x=12.5$  mm剖面沿 $x, y, z$ 三个方向的 $u, v, w$ 变形场及Von Mises等效应变图。试件以沿 $z$ 方向,即加载方向的压缩变形为主,从 $u, v$ 场变形可清楚看出在图9(b)宏观裂隙产生的位置处,位移梯度在增加,出现正负位移的分界。由图10(d)所示的等效应变也可以看出试件在破坏前,局部产生高应变区域,这些区域随载荷增加逐渐发展,最终发展成宏观裂隙导致试件破坏。通过变形场与应变场可以直观显示试件内部变形分布情况,为揭示变形局布化区域的产生及发育过程提供定量的可视化方法。

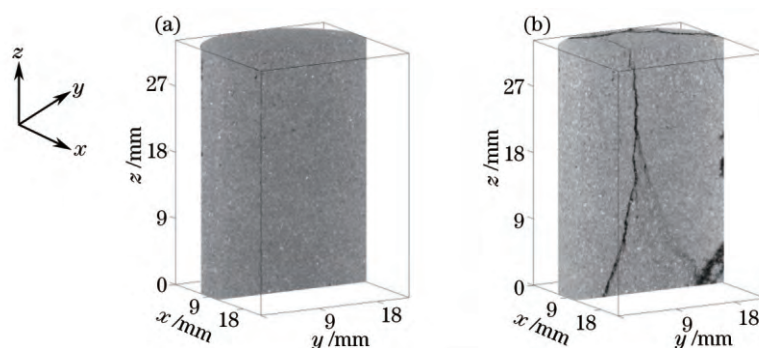


图9 试件剖面的灰度图。(a)第7步;(b)第8步

Fig.9 Section gray images of the specimen. (a) Step 7; (b) step 8

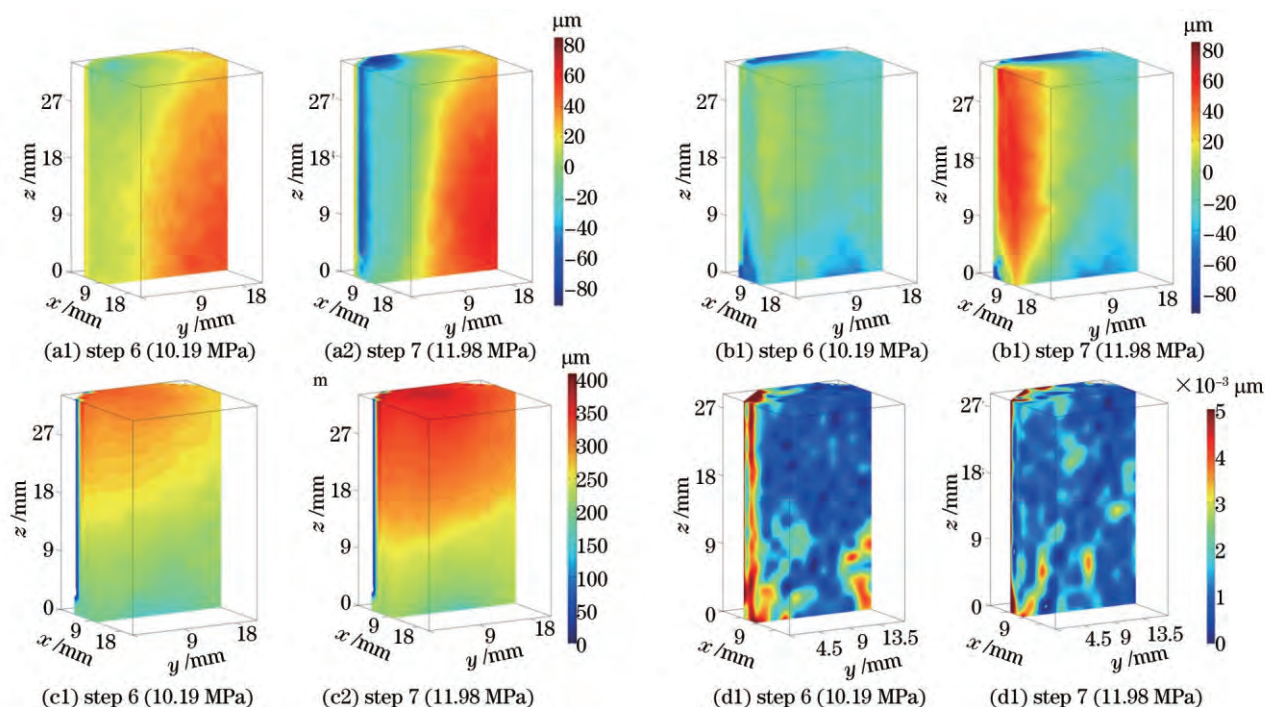


图10 变形等值分布图。(a)  $u$ 场;(b)  $v$ 场;(c)  $w$ 场;(d) Von Mises 等效应变

Fig.10 Deformation distribution contours. (a)  $u$  field; (b)  $v$  field; (c)  $w$  field; (d) Von Mises equivalent strain



## 5 讨 论

### 5.1 岩石内部结构的散斑特征

岩石内部由不同矿物及孔隙构成,不同成份具有不同的密度,在CT图像中显示为不同的灰度值,这种天然结构可以作为散斑结构,从而成为变形信息的载体。不同种类的岩石其内部结构不同,作为散斑结构进行测量时,其精度也有所差异。图11为中砂岩、红砂岩和油砂岩的CT图像,定义图像归一化自相关函数值为0.5时所对应的像素值为等效的散斑颗粒半径值<sup>[24]</sup>,图11(d)为三种岩样的自相关函数分布曲线,等效的散斑颗粒半径值由小到大依次为红砂岩、中砂岩和油砂岩,由前面有关粒径与精度间关系的分析可知:当采用DVSP法进行分析时,在相同参数条件下,测量精度最高为红砂岩,其次是中砂岩,最低为油砂岩。

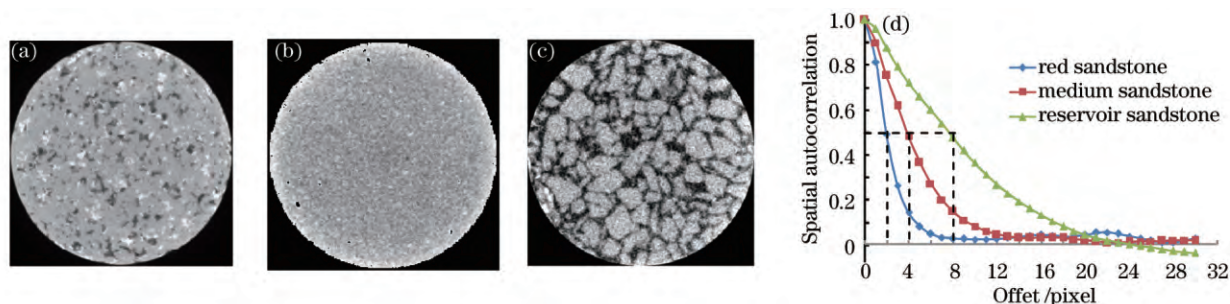


图11 岩石试件的CT图像。(a)中砂岩;(b)红砂岩;(c)油砂岩;(d)自相关函数曲线

Fig.11 CT images of the rock specimens. (a) Medium sandstone; (b) red sandstone; (c) reservoir sandstone; (d) autocorrelation curves

### 5.2 计算效率

由于DVSP法采用了FFT运算,大大提高了计算效率。如子块体搜索区域为 $n$  voxel, DVSP法的计算复杂度为 $O(2n^3 \lg n)$ ,而DVC法为 $O(n^6)$ ,其中 $O(\cdot)$ 为同阶无穷小,足可见DVSP在计算效率上的优势,而且随着搜索区域的增加,这一优势就愈加明显。

DVSP法在获取位移时,忽略了子块体内部的变形;而在DVC算法中可以考虑子块体内部变形,提高测量的精度,但同时也增加了计算的复杂性与运算量。在利用DVSP法时,为了减小子块体内部变形造成的测量误差,一方面在满足一定精度条件下,选取小尺寸的子块体;另一方面可以增加扫描次数,对相邻两次的体图像采用DVSP法进行测量。

### 5.3 CT图像伪影的影响

由于射线源,探测器及重建算法等因素的影响,CT图像中会存在多种伪影及畸变<sup>[25-26]</sup>,如:由于图像X射线波长的非单一性,对于密度高的物质易产生边缘硬化,即同一材料,试件边缘的灰度值高于中间的灰度值;探测器各单元闪烁体的不均匀性,会导致图像中产生环形伪影。此外,CT扫描过程中,试件由转台带动做旋转运动,转台的稳定性及回位精度也将影响着测量计算结果。

为了更好地了解ACTIS300-320/225工业CT系统误差影响,对红砂岩试件在同一扫描条件下连续扫描两次,试件除去扫描时的旋转运动外,没有附加任何位移与变形。把两次扫描的体图像分别作为参考体图像与变形后体图像,利用DVSP法进行位移场计算,体图像大小为 $900 \text{ voxel} \times 900 \text{ voxel} \times 600 \text{ voxel}$ ,子块体尺寸为 $64 \text{ voxel} \times 64 \text{ voxel} \times 64 \text{ voxel}$ ,平移距离为 $32 \text{ voxel}$ ,每个体素对应的实际尺寸为 $29 \mu\text{m}^3$ ,沿转轴方向为 $z$ 轴方向。表1给出了误差统计结果。在理想情况下,各点位移应该为零,但是由于上述因素,试件内部结构及算法的影响,各点位移并不为零,存在一定的误差。从平均值来看,三个方向的平均值绝对值均大于标准偏差,在 $x$ 和 $z$ 方向有着较大位移,为 $y$ 方向位移值近2.5倍,说明两次扫描中,由于系统的扰动引起了试件的移动。此外,图像中环形伪影的存在也会增加局部区域的误差。上述红砂岩单轴压缩实验中,试件的变形远大于机械系统及图像噪声伪影所引入的误差,所以测量结果是可靠的。

## 6 结 论

提出了用于物体内部三维变形场分析的DVSP法,对其精度影响因素进行了分析,并测量了单轴加载红



表 1 伪影及机械运动引起的误差

Table 1 Errors caused by artifacts and imperfect motion

Displacement	Min /voxel	Max /voxel	Mean /voxel	STD /voxel
$u$	-0.270	0.010	-0.152	0.043
$v$	-0.130	0.010	-0.059	0.030
$w$	0.027	0.250	0.149	0.033

砂岩内部的变形场,得到以下结论:

1) DVSP法采用两步快速傅里叶变换,提高了三维变形分析时的计算效率,其测量精度与散斑颗粒的尺寸、数目、子块体尺寸及图像的对比度等因素有关;

2) 岩石内部结构可以作为散斑结构,成为变形信息的载体,通过 DVSP法分析得到的变形场,可以直观清楚地反映岩石受载下内部变形的情况,有助于岩石内部局部变形区域演化过程的定量及可视化分析。

### 参 考 文 献

- 1 W H Peters, W F Ranson. Digital imaging technique in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213427.
- 2 Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20: 062001.
- 3 Shi Hongjian, Ji Hongwei, He Xiaoyuan. Optical 3D deformation measurement system and its application to investigation of mechanical behaviors of micro-structure [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312007.  
史红健, 计宏伟, 何小元. 一种三维变形光学测量系统及微结构力学性能测试应用[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312007.
- 4 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412004.  
潘 兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- 5 Ren Maodong, Liang Jin, Tang Zhengzong, *et al.*. Microscopic three-dimensional deformation measurement system based on digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512002.  
任茂栋, 梁 晋, 唐正宗, 等. 微尺度三维变形测量的显微数字图像相关系统[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512002.
- 6 Yan Xin, Dong Junqin, Li Qinghui, *et al.*. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908001.  
严 鑫, 董俊卿, 李青会, 等. 基于 OCT 技术对古代瓷釉断面结构特征的初步研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908001.
- 7 B K Bay, T S Smith, D P Fyhr, *et al.*. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(3): 217-226.
- 8 F Forsberg, M Sjodahl, R Mooser, *et al.*. Full three-dimensional strain measurements on wood exposed to three-point bending: analysis by use of digital volume correlation applied to synchrotron radiation micro-computed tomography image data [J]. Strain, 2010, 46(1): 47-60.
- 9 N Lenoir, M Bornert, J Desrues, *et al.*. Volumetric digital image correlation applied to X-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock [J]. Strain, 2007, 43(3): 193-205.
- 10 S A Hall, M Bornert, J Desrues, *et al.*. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray  $\mu$ CT and volumetric digital image correlation [J]. Géotechnique, 2010, 60(5): 315-322.
- 11 Stéphane Roux, Francois Hild, Philippe Viot, *et al.*. Three dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam [J]. Composites Part A, 2008, 39(8): 1253-1265.
- 12 J Réthoré, N Limodin, J Y Buffière, *et al.*. Digital volume correlation analysis of synchrotron tomographic images [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineer Design, 2011, 46(7): 683-695.
- 13 Wang Min, Hu Xiaofang, Wu Xiaoping. Digital image correlation method for the analysis of 3-D internal displacement field in object [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5135-5139.  
汪 敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的数字图像相关方法[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5135-5139.
- 14 Pan Bing, Wu Dafang, Xie Huimin, *et al.*. Spatial-gradient-based digital volume correlation technique for internal deformation measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612005.  
潘 兵, 吴大方, 谢惠民, 等. 基于梯度的数字体图像相关方法测量物体内部变形[J]. 光学学报, 2011, 31 (6): 0612005.

- 15 Bing Pan, Dafang Wu, Zhaoyang Wang. Internal displacement and strain measurement using digital volume correlation: a least-squares framework [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(4): 045002.
- 16 Jianyong Huang, Xiaochang Pan, Shanshan Li, *et al.*. A digital volume correlation technique for 3-D deformation measurements of soft gels [J]. International Journal of Applied Mechanics, 2011, 3(2): 335–354.
- 17 D J Chen, F P Chiang. Computer-aided speckle interferometry using spectral amplitude fringes [J]. Appl Opt, 1993, 32(2): 225–236.
- 18 D J Chen, F P Chiang, Y S Tan, *et al.*. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method [J]. Appl Opt, 1993, 32(11): 1839–1849.
- 19 F P Chiang. Super-resolution digital speckle photography for micro/nano measurements [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47: 274–279.
- 20 Qi Dongping, Teng Shuyun, Cheng Chuanfu. Digital speckle correlation in frequency domain [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(4): 489–493.  
亓东平, 滕树云, 程传福. 频率域数字散斑相关方法的研究[J]. 光学学报, 2000, 20(4): 489–493.
- 21 F P Chiang, L T Mao. Development of interior strain measurement techniques using random speckle patterns [J]. Meccanica 2015, 50(2): 401–410.
- 22 M Sjö Dahl. Accuracy in electronic speckle photography [J]. App Opt, 1997, 36(13): 2875–2885.
- 23 H W Schreier, J R Braasch, M A Sutton. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation [J]. Opt Eng, 2000, 39(11): 2915–2921.
- 24 M Bornert, F Brémand, P Doumalin, *et al.*. Assesement of digital image correlation measurement errors: methodology and results [J]. Experimental Mechanics, 2009, 49: 353–370.
- 25 Min Yang, Haidong Gao, Xingdong Li, *et al.*. A new method to determine the center of rotation shift in 2D-CT scanning system using image cross correlation [J]. NDT & E International, 2012, 46: 48–54.
- 26 N Limodin, J Réthoré, J Adrien, *et al.*. Analysis and artifact correction for volume correlation measurements using tomographic images from a laboratory X-ray source [J]. Experimental Mechanics, 2011, 51: 959–970.

栏目编辑: 史 敏