

文章编号:1004-7220(2012)01-0021-06

## 基于显微 CT 的骨微观三维变形场测量系统的研究

孟昊业<sup>1</sup>, 马沁巍<sup>2</sup>, 汪爱媛<sup>1</sup>, 马少鹏<sup>2</sup>, 彭江<sup>1</sup>, 许文静<sup>1</sup>, 卢世璧<sup>1</sup>

(1. 解放军总医院 骨科研究所, 北京 100853; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

**摘要:** **目的** 初步构建一套集成显微 CT 与力学加载装置的测试系统, 结合数字体相关技术 (digital volume correlation, DVC) 实现骨组织内部微观三维变形场的测量。**方法** 选用微型力学加载装置进行单轴压缩试验, 维持载荷不变的同时对试样进行 CT 扫描; 采用 DVC 方法对连续 CT 图像序列进行相关匹配和搜索计算, 测量载荷变化前后试样内部结构沿三维方向的微观位移值; 通过零位移重复扫描和刚体平移评价该系统的测量精度及准确度; 利用该系统测试牛松质骨块的三维位移场分布。**结果** 零位移重复扫描结果显示该系统测量加载方向的位移准确度最高, 测量精度低于 CT 扫描分辨率的 1/10; 刚体平移结果显示计算位移标准差为 0.001 ~ 0.002  $\mu\text{m}$ ; 松质骨块测试区域在 600 N 载荷作用下沿加载方向的微观位移范围为 100.35 ~ 110.25  $\mu\text{m}$ , 位移场呈现多层逐级分布。**结论** 该系统能够满足数字体相关法测量位移的准确度及精度要求, 能够实现骨组织内部微观结构的三维变形场测量, 可以作为进一步研究骨组织内部变形分布与结构成分响应关系的测量平台。

**关键词:** CT 扫描; 数字体相关; 变形场; 骨组织; 载荷

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Three-dimensional deformation field measurement system based on micro-CT images

MENG Hao-ye<sup>1</sup>, MA Qin-wei<sup>2</sup>, WANG Ai-yuan<sup>1</sup>, MA Shao-peng<sup>2</sup>, PENG Jiang<sup>1</sup>, XU Wen-jing<sup>1</sup>, LU Shi-bi<sup>1</sup> (1. *Institute of Orthopedics, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China*; 2. *School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

**Abstract: Objective** To develop a novel measurement system composed of micro-CT, mechanical loading device and digital volume correlation (DVC) technique, so as to measure the three-dimensional microstructural deformation field in bone tissue. **Methods** Uniaxial compression was applied on the specimen with the micromechanical loading device, and CT scans were also conducted while maintaining the same loads; then sequential CT images were matched and searched accordingly by DVC method to calculate the micro-displacement in the specimen along three directions before and after loading; repeated scanning of zero-displacement and rigid body translation were used to evaluate the accuracy and precision of the system. The three-dimensional distribution of displacement field in bovine cancellous bone was measured by the system. **Results** The result from repeated scanning of zero-displacement showed that the highest accuracy of measurement was performed in the loading direction and the precision was less than tenth of the CT resolution. The result of rigid body translation showed that the standard deviation was 0.001 ~ 0.002  $\mu\text{m}$ . For cancellous bone specimen under the load of 600 N, the range of micro-displacement was 100.35 ~ 110.25  $\mu\text{m}$ , with multilayer field distribution. **Conclusions** The accuracy and precision of this measurement system can meet the requirement of DVC method. It is proved that this system can be used for measuring the three-dimensional micro-deformation field in the cancellous bone and as a measurement platform for investigating the relationship between deformation distribution and structural response in bone tissue for the future research.

**Key words:** CT scans; Digital volume correlation (DVC); Deformation field; Bone tissue; Loads

收稿日期:2011-05-04; 修回日期:2011-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30872633, 30930092)。

通讯作者:汪爱媛, 副教授, Tel: (010) 66939202; E-mail: wangaiyuan301@yahoo.com.cn。

骨组织在生物体内承担着传递载荷的重要功能。由于其内部具有复杂的非线性微观结构,因而探索承载状态下的载荷分布与微观结构形变对于研究骨质疏松骨折、骨坏死等骨病发生的力学机制有着重要的意义。近年来,大量研究采用有限元方法对骨结构形变进行模拟分析,建立了能够反映松质骨微观结构的有限元模型<sup>[1-2]</sup>;但是受到材料赋值、虚拟载荷以及边界条件的限制,须进行大量的简化处理,故模拟结果具有一定局限性,无法全面反映骨组织内部微观结构变化对其承载能力的影响。本试验构建了基于显微CT的力学测试及图像分析系统,通过扫描载荷变化前后的试样,得到不同载荷作用下的三维结构图像数据,并利用数字体相关技术(digital volume correlation, DVC)对两组图像序列进行相关分析,获取内部结构的三维位移场分布。构建该系统的目的是为了使观测试样的微观结构影像与生物力学实验可以同步实施,从结构信息含量丰富的CT图像直接计算得到变形位移场分布,为研究骨组织内部微观结构形变提供可靠的试验数据,从而有效地分析和检测内部结构的损伤及形变过程,进一步预测骨组织局部结构病变和骨折的发生。

## 1 设备与方法

### 1.1 实验装置

微型力学加载装置及其控制组件构成系统的加载单元; Micro CT (Explore Locus SP, GE Healthcare Technologies, 美国)及其配套装置构成检测单元,两者分别由计算机独立控制,如图1所示。

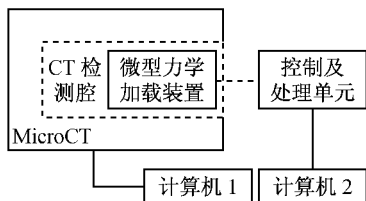


图1 测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the measurement system

微型力学加载装置的外周固定支架和压头均采用高硬度聚乙烯材料制备,该材料可供X射线穿透而不影响射线强度,避免采用金属部件造成伪影干扰。另外该装置结构设计紧凑,体积大小符合本系

统采用的Micro CT检测腔尺寸要求,能够全部进入腔内进行扫描(见图2)。载荷控制精度为0.1 N,量程为0~2 500 N,位移控制精度为1  $\mu\text{m}$ ,传动装置和数据处理单元均由计算机控制。

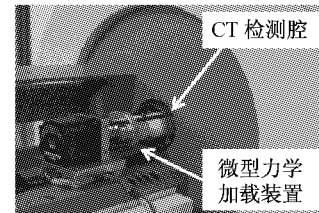


图2 显微CT及力学加载装置

Fig.2 Micro CT and the mechanical loading device

### 1.2 数字体相关分析

数字体相关技术是由“二维相关”扩展至“三维体相关”的数字图像相关技术<sup>[3]</sup>,其原理如图3所示:将变形前的图像作为参考图像(见图3(1)),变形后的图像作为目标图像(见图3(2)),将两组图像序列位于同一个三维虚拟网格中,利用图像中的特征点以及点周围的灰度分布确定两幅图像之间的相关性。对于参考图像中的特征点(图3(1)A),在目标图像序列中搜索与其相关程度最高的点作为该特征点在目标图像中的新位置(图3(2)A'),两者之间的位移变化量即为该点的形变值。在体相关搜索算法中,整像素搜索采用立方体内三步搜索法,亚像素搜索采用曲面拟合插值法。

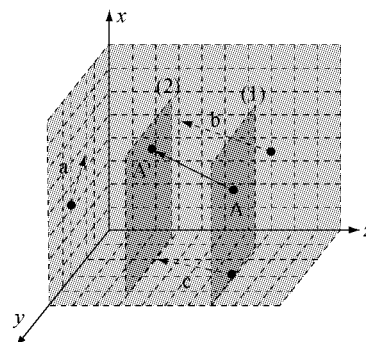


图3 数字体相关匹配搜索示意图 (1)参考图像,(2)目标图像

Fig.3 Schematic diagram of digital volume correlation (1) Reference image, (2) Target image

另外,作为表征相关程度的参数——相关系数,

其形式也由二维扩展至三维,即

$$C = [N^3 \sum \sum \sum (f \cdot g) - (\sum \sum \sum f) \cdot (\sum \sum \sum g)] / \{ [N^3 \sum \sum \sum f^2 - (\sum \sum \sum f)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [N^3 \sum \sum \sum g^2 - (\sum \sum \sum g)^2]^{\frac{1}{2}} \} \quad (1)$$

式中: $C$ 为相关系数, $f$ 为参考图像各点灰度值, $g$ 为目标图像各点灰度值, $N$ 为计算窗口尺寸。

由于 CT 图像包含大量灰度信息并且具有较高的空间分辨率,故图像中单个或多个像素点即可作为特征点进行体相关分析。本试验将载荷变化前后的 CT 图像分别作为参考图像和目标图像。在参考图像序列中选取一定尺寸的兴趣区作为计算窗口,搜索该窗口中各个点在目标图像序列中的最大相关点,即利用数字体相关法对二者进行相关分析,计算位移变化量。

## 2 系统精度和准确度的表征

关于数字体相关法的计算精度和准确度表征已有大量文献报道。综合 Micro CT 扫描分辨率、加载装置控制精度以及体相关算法精度等影响因素,本试验采用原位重复扫描和刚体平移两种方法对系统精度和准确度进行表征<sup>[4]</sup>。准确度由位移平均值确定,精度值由位移标准差确定<sup>[5]</sup>。原位重复扫描是将标准试样连同加载装置放入 CT 检测腔内,在零载荷状态下采用同一协议重复扫描。利用上述体相关法对扫描前后 CT 图像进行分析计算。由于实际位移值为 0,体相关计算位移值与 0 值比较可以评价位移精度及准确度。试样原位重复扫描 3 次,每两组之间进行体相关分析可得 3 组计算结果。将每组图像沿加载方向划分为 3 个尺寸相同的计算窗口分别进行相关分析,同一条件下的计算样本总数可达 9 组。刚体平移采用高精度微动平台对试样进行平移,每次平移后进行 CT 扫描。利用体相关法对平移前后 CT 图像进行分析,比较计算位移值与实际平移量,评价体相关算法对实际位移的计算精度和准确度。上述两种方法均采用同一块牛松质骨作为标准试样进行测试。

## 3 测试系统应用实例

### 3.1 试样预处理

选取新鲜成年牛松质骨,取材于胫骨平台下侧,制备成 10 mm × 10 mm × 15 mm 长方体松质骨块。

### 3.2 力学加载试验

单轴压缩试验载荷分别为 0 和 600 N ( $\Delta F = 600$  N),加载速度为 200  $\mu\text{E}/\text{s}$ 。为了减少应力松弛的影响,加载到预定载荷后静置 15 min,当载荷趋于稳定后再行 Micro CT 扫描

### 3.3 Micro CT 扫描

扫描条件为:电压 80 kV,电流 450  $\mu\text{A}$ ,空间分辨率为 45  $\mu\text{m} \times 45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ 。扫描后可得 400 张连续图像序列,选取 195 pixel × 190 pixel × 250 pixel 为兴趣区进行精细化重建。重建后获得断层图像用于后续相关分析。

### 3.4 CT 图像的体相关分析

如前所述,将载荷为 0、600 N 的图像分别作为参考图像序列(见图 4(a))和目标图像序列(见图 4(b)),在图 4(a)中选取 150 pixel × 150 pixel 兴趣区作为计算窗口,根据体相关法搜索该窗口中每一点在图 4(b)中的最大相关点,利用两点间的坐标变化确定计算窗口的三维位移场分布。

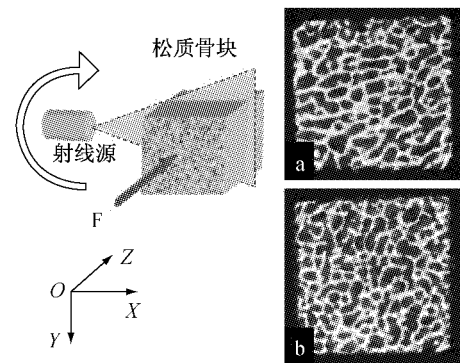


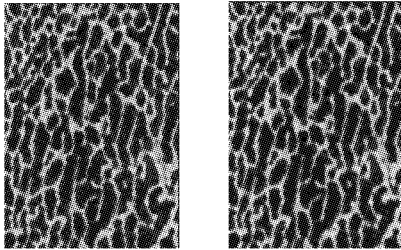
图 4 试样加载、扫描及分析示意图 (a) 载荷 0 N, (b) 载荷 600 N  
 Fig.4 Diagram of loading, CT scans and analysis on the specimen (a) 0 N load, (b) 600 N load

## 4 结果

### 4.1 系统测试精度和准确度

图 5 是原位重复扫描同一层面的 CT 图像。表 1 为不同计算窗口沿三维方向的位移平均值及标准差。Z 方向(加载方向)位移平均值均小于其他方

向,即计算位移值与0值最为接近,最小值为0.004 pixel(0.180  $\mu\text{m}$ ),准确度最高;3个窗口的Z方向位移标准差相近,均高于X、Y方向标准差。



(a) 第1次扫描 (b) 第2次扫描

图5 零位移重复扫描后的CT图像断层局部

Fig.5 Local CT images of repeated scanning of zero-displacement (a) The first scanning, (b) The second scanning

表1 不同计算窗口在三维方向的位移平均值和标准差

Tab.1 Average displacement and standard deviation in three directions at different zones

		X/ $\mu\text{m}$	X/pixel	Y/ $\mu\text{m}$	Y/pixel	Z/ $\mu\text{m}$	Z/pixel
A	平均值	6.570	0.146	-3.105	-0.069	1.080	0.024
	标准差	2.655	0.059	1.980	0.044	3.060	0.068
B	平均值	6.615	0.147	-3.420	-0.076	0.495	0.011
	标准差	2.520	0.056	1.710	0.038	3.240	0.072
C	平均值	7.200	0.160	-3.150	-0.070	0.180	0.004
	标准差	2.565	0.057	1.890	0.042	2.880	0.064

刚体平移的实际位移量包括整像素平移(1.000,1.500,2.000 pixel)和亚像素平移(0.500,0.600 pixel),体相关法计算位移结果如表2所示。平均位移值均与实际位移值接近,标准差为0.001~0.002  $\mu\text{m}$ ,可见该方法计算位移精度高于原位重复扫描的计算位移精度。

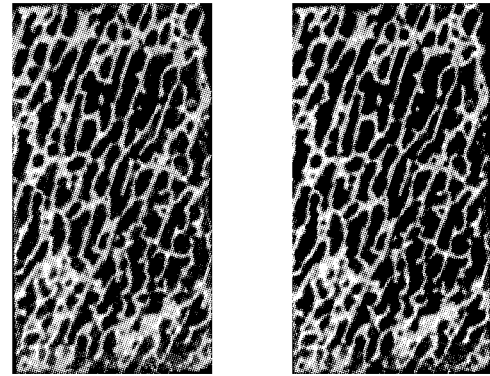
表2 不同计算窗口的计算位移平均值和标准差

Tab.2 Average displacement and standard deviation calculated by rigid transplantation at different zone

实际位移/pixel	实际位移/ $\mu\text{m}$	平均值		标准差	
		计算位移/pixel	计算位移/ $\mu\text{m}$	计算位移/pixel	计算位移/ $\mu\text{m}$
0.500	0.023	0.484	0.022	0.033	0.002
0.600	0.027	0.583	0.026	0.034	0.002
1.000	0.045	1.005	0.045	0.017	0.001
1.500	0.068	1.515	0.068	0.031	0.001
2.000	0.090	2.013	0.091	0.025	0.001

## 4.2 应用实例测试结果

图6为牛松质骨试样载荷变化前后同一层面的CT图像。



(a) 载荷0 N (b) 载荷600 N

图6 载荷变化前后松质骨块加载方向的同一层面CT图像

Fig.6 CT images of the cancellous bone in loading direction before and after the compression (a) 0 N load, (b) 600 N load

对载荷变化前后的CT图像进行体相关分析,得到三维位移场分布如图7所示( $F$ 为加载方向)。其中图7(a)、(b)分别为垂直于加载方向的位移场分布图。图7(a)显示位移场在X-Y及X-Z层面上近似对称分布,位移值由中心向两侧逐渐增大,两端位移达到最大值0.32 pixel(14.4  $\mu\text{m}$ )。图7(b)同样显示位移场在X-Y、Y-Z面上近似对称分布。图7(c)是位移场沿加载方向的分布。结果显示其逐层分布,位移范围为2.23~2.45 pixel(100.35~110.25  $\mu\text{m}$ );局部区域位移集中且大于同一层面位移平均值。

## 5 讨论

骨组织内部为复杂的多孔结构,其连续性和骨密度呈非线性分布<sup>[6]</sup>,此种结构决定了骨骼内部力学行为的各向异性<sup>[7]</sup>。目前,在宏观水平上对骨组织的力学性能已经进行了大量的研究<sup>[8-9]</sup>,然而其内部微观结构的形变信息还有待进一步探索。由于Micro CT能实现显微等级结构(如骨小梁)的体外成像,故本研究采用Micro CT作为检测单元,在力学加载状态下获取骨组织内部三维结构信息。

获取不同承载状态下的CT图像后,如何对图像进行分析以便得到结构变形信息是本研究的重点内容。数字图像相关技术是一种高精度、非接触式

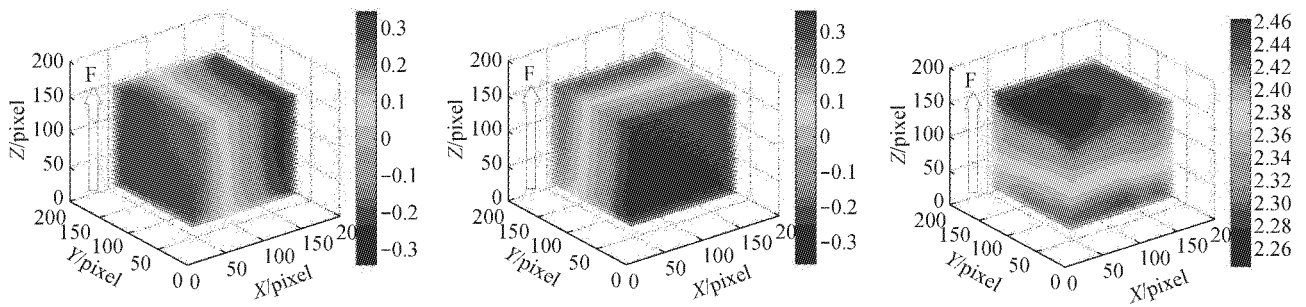


图7 牛松质骨块三维位移场分布  
 Fig.7 Three-dimensional displacement fields of the bovine cancellous bone

全场位移分析方法,基于变形前后图像之间的相关性实现试样表面位移的测量<sup>[10-12]</sup>。由于其只能记录表面信息,相关分析也只局限于试样的表面变形,对于内部结构的三维形变测量,二维数字图像相关法已经无法满足<sup>[13]</sup>。

在实现如何对灰度图像进行相关搜索和匹配的基础上,本研究从二维数字图像相关扩展至三维数字体相关,将相关系数的表达形式扩展至三维(见式(1))。该算法的最大优点是实现特征点沿三维方向的搜索匹配,由此获得内部结构的三维形变场分布。目前,关于数字体相关技术的研究主要集中在工业和医学领域,用于检测机体内部的异质相或结构缺陷等。如 Lee 等<sup>[14]</sup>利用体相关法对变形前后的乳腺模块 CT 图像进行相关分析,通过三维应变场识别模块中的硬质点。另外,本研究选用牛松质骨作为标本,主要由于其骨密度高、骨小梁分布致密,因此 CT 影像纹理清晰、灰度差别明显,便于特征点的识别和相关分析。

目前基于 CT 图像的数字体相关算法精度和准确度的研究还在不断地深入。早期研究结果显示:应用体相关法测量位移的精度范围为 0.005 ~ 0.056 pixel,应变的测量精度为 0.01 ~ 10  $\mu\epsilon$ <sup>[4-5,15]</sup>。本实验分别采用原位重复扫描和刚体平移两种方法评价系统准确度及精度。其中,原位重复扫描是在位置不变的情况下重复扫描试样多次,由于实际位移值为 0,因而体相关计算位移值越接近于 0 越准确。结果显示,沿加载方向的位移测量准确度最高。由于骨密度和窗口尺寸的影响,局部区域灰度值在扫描前后存在差别,在小尺寸计算窗口中所占比例增加,造成位移标准差较大。然而,0.068 pixel

(3.06  $\mu\text{m}$ )仍低于 Micro CT 扫描分辨率(45  $\mu\text{m}$ )的 1/10,故该精度可以满足实验要求。刚体平移测试结果显示,计算位移值与刚体平移量接近,标准差最大值为 0.034 pixel (0.002  $\mu\text{m}$ ),最小值为 0.017 pixel (0.001  $\mu\text{m}$ );该精度明显高于原位重复扫描计算精度,主要原因是该方法针对体相关算法精度,未包含加载装置的位移控制精度。另外,计算窗口尺寸选择不同也是造成精度差别的重要原因之一,其影响机理目前还在进一步研究;在扫描分辨率为 45  $\mu\text{m}$ 时,体相关算法的精度能够满足形变测量的要求。因此,提高加载装置的位移控制精度和选取合适的计算窗口将有助于进一步提升系统的测试精度。

松质骨结构具有特异性分布的特点,并且与应力传递直接相关<sup>[16]</sup>。本研究选取牛松质骨块进行测试。结果显示,在垂直于加载方向的层面内,位移场呈对称分布(见图 7(a)、(b)),沿加载方向的位移场则呈逐级多层分布(见图 7(c)),同一层面的位移值近似相等,局部区域位移集中且大于该层面位移平均值。上述结果表明,该系统能够定量评价骨组织结构在承载状态下的微观位移值,也可以对组织结构损伤、应力集中区、微观大变形的位位置以及力学因素主导下的裂纹扩展进行实时定位分析,指导骨质疏松、骨坏死、骨修复与再生等基础研究及药物疗效的评价实验。

## 6 结论

本研究初步构建了一套集成 Micro CT 与力学加载装置的测试系统,利用数字体相关技术,实现了骨组织内部微观结构的三维形变位移场测量。该系

统主要解决三方面问题,即骨组织的力学加载试验、微观结构的高精度影像获取以及基于 CT 图像的数字体相关分析。通过原位重复扫描和刚体平移测试,确定该系统的准确度和精度满足形变测量的要求。在此基础上,对牛松质骨块进行实例测试,计算载荷变化时内部结构的微观位移值,结果显示三维方向的位移场分布均符合材料的压缩形变特征,证明该测试系统能够满足骨组织内部结构的微观位移测量。由于基于 CT 图像的体相关分析法比目前常用的二维数字图像相关法更加直观且符合测量实际,在进一步提高系统精度和运算速度的基础上,如何揭示骨组织内部形变与组织结构参数(如骨小梁间隙、骨小梁厚度等)之间的关系是本文下一步研究的重点。另外,该测试系统也可以拓展应用到其他不均匀或多孔材料的结构与力学性能研究中。

#### 参考文献:

- [1] Bessho M, Ohnishi I, Matsuyama J, *et al.* Prediction of strength and strain of the proximal femur by a CT-based finite element method [J]. *J Biomech*, 2007, 40(8): 1745-1753.
- [2] 马信龙, 付鑫, 马剑雄, 等. 股骨头内松质骨空间分布和力学性能变化有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 465-470.  
Ma XL, Fu X, Ma JX, *et al.* Finite element study on spatial distribution and mechanical properties of cancellous bone from femoral head [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 465-470.
- [3] Germaneau A, Doumalin P, Dupre JC. Full 3D strain measurement by digital volume correlation from X-ray computed and optical scanning tomography images [J]. *Exp Anal Nano Eng Mater Struct*, 2007, C, 6: 553-554.
- [4] Bay BK, Smith TS, Fyhrie DP, *et al.* Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using X-ray tomography [J]. *Exp Mech*, 1999, 39(3): 217-226.
- [5] Liu L, Morgan EF. Accuracy and precision of digital volume correlation in quantifying displacement and strains in trabecular bone [J]. *J Biomech*, 2007, 40(15): 3516-3520.
- [6] Moore TLA, Gibson LJ. Microdamage accumulation in bovine trabecular bone in uniaxial compression [J]. *J Biomech Eng*, 2002, 124(1): 63-71.
- [7] Shefelbine SJ, Simon U, Claes L, *et al.* Prediction of fracture callus mechanical properties using micro-CT images and voxel-based finite element analysis [J]. *Bone*, 2005, 36(3): 480-488.
- [8] Hoffmeister BK, Smith SR, Handley SM, *et al.* Anisotropy of young's modulus of human tibial cortical bone [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2000, 38(3): 333-338.
- [9] Homminga J, McCreddie BR, Weinans H, *et al.* The dependence of the elastic properties of osteoporotic cancellous bone on volume fraction and fabric [J]. *J Biomech*, 2003, 36(10): 1461-1467.
- [10] 张东升. 数字图像相关测量技术及其应用[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 85-88.  
Zhang DS. Digital image correlation: Theory and applications [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(2): 85-88.
- [11] Peters WH, Ranson WF. Digital image techniques in experimental stress analysis [J]. *Opt Eng*, 1982, 21(3): 427-432.
- [12] 侯振德, 徐蓬云. 利用图像相关法测量骨拉伸弹性模量随试件厚度的变化规律[J]. *中国生物医学工程学报*, 2002, 21(6): 506-510.
- [13] Pavel S, Maximilien V, Robin O, *et al.* Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia [J]. *J Biomech*, 2010, 43(4): 599-605.
- [14] Lee SY, Kim GW, Han BH, *et al.* Strain measurement from 3D micro-CT images of a breast-mimicking phantom [J]. *Comput Biol Med*, 2011, 41(3): 123-130.
- [15] Verhulst E, Van RB, Huiskes R. A three-dimensional digital image correlation technique for strain measurement in microstructures [J]. *J Biomech*, 2004, 37(9): 1313-1320.
- [16] 汪爱媛, 彭江, 孙明学, 等. 不同结构骨块植入股骨头负重区缺损的力学性能比较[J]. *医用生物力学*, 2006, 21(4): 304-308.  
Wang AY, Peng J, Sun MX, *et al.* Biomechanical comparison of different structural bone grafting in femoral heads' defects of weight-bearing region [J]. *J Med Biomech*, 2006, 21(4): 304-308.