

文章编号:1004-7220(2016)02-0129-06

基于 CT 图像的股骨上段有限元建模及单元尺寸分析

董鹏飞, 雷建银, 刘海波, 李志强, 王志华

(太原理工大学 应用力学与生物医学工程研究所, 太原 030024)

摘要: **目的** 基于 CT 图像构建 5 个不同的股骨上段有限元模型, 并分析模型单元尺寸对股骨模型材料属性分布以及生物力学性能的影响。 **方法** 利用螺旋 CT 扫描股骨上段并以 DICOM 格式输出图像文件, 利用 Mimics 软件提取三维几何文件, 分别使用 Mimics、3-Matica、ICEM 软件生成体素网格模型、四面体网格模型和 3 个六面体网格模型(单元尺寸分别为 2、1 和 0.5 mm), 在 Mimics 中对网格文件进行材料赋值, 将最终的有限元模型导入 ABAQUS 中进行力学行为分析。 **结果** 单元尺寸对 5 个模型总质量影响较小, 5 个模型沿相同路径上节点处 Von Mises 应力和节点位移整体变化趋势一致, 但是各个节点处 Von Mises 应力误差较大, 单元尺寸为 0.5 mm 的六面体网格模型与体素网格模型各节点处 Von Mises 应力值接近。 **结论** 基于 CT 灰度值进行材料赋值时, 单元尺寸对模型的总质量和节点位移影响较小, 但是单元尺寸的减小将导致模型中各材料含量和分布的改变, 引起应力分布的变化。当模型单元尺寸与体素尺寸接近时, 能较好反映股骨的质量分布和力学行为。

关键词: 股骨上段; 有限元分析; 三维重建; 单元类型; 材料赋值

中图分类号: R318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.02.129

Finite element modeling of proximal femur and element size analysis based on CT images

DONG Peng-fei, LEI Jian-yin, LIU Hai-bo, LI Zhi-qiang, WANG Zhi-hua (*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract: **Objective** To establish 5 different finite element models of proximal femur based on CT images, and analyze the influences of the element size on material property distribution and biomechanical behavior of the proximal femur model. **Methods** The proximal femur was scanned by spiral CT. The images, stored as DICOM format, were extracted by Mimics to obtain 3D geometric data, and then meshed separately by Mimics, 3-Matic and ICEM software to create a voxel element model, a tetrahedral element model and 3 hexahedral element models (with element size of 2, 1, 0.5 mm, respectively). These meshed models were assigned materials by Mimics, and their mechanical behavior was analyzed by ABAQUS eventually. **Results** For the proximal femur model with material assignment based on CT images, the influence of element size on the total mass of all the 5 models was not significant. The nodal Von Mises stress and nodal displacement along the same path in 5 models showed a similar tendency, while the Von Mises stress at each node displayed an obvious deviation. The nodal Von Mises stress in the hexahedral element model with the element size of 0.5 mm showed accordance with the voxel element model. **Conclusions** The element size has a small influence on the total mass and nodal displacement when the material assignment is attributed to the model based on CT gray values, while decrease in the element size will change the materials distributions and affect stress distributions of the model. When the element size of the proximal femur model is close to its voxel size, the mass distributions and mechanical behavior of the femur can be preferably reflected.

Key words: Proximal femur; Finite element analysis; 3D reconstruction; Element type; Materials assignment

收稿日期:2015-08-14; 修回日期:2015-10-27

基金项目:山西省高等学校创新团队支持计划项目。

通信作者:王志华,教授,博士研究生导师, E-mail: wangzh@tyut.edu.cn。

目前,骨科生物力学的研究主要包括临床观察与解剖、尸体标本实验、标准人体假肢试验和有限元仿真等多种手段,考虑到实验材料获取难易程度、实验体个体差异、对实验设备和技术的要求以及试验成本等因素,有限元方法被越来越广泛地应用于生物力学分析^[1-3]。在股骨上段有限元仿真方面,早期有学者将股骨简单区分为密质骨和松质骨^[4-5],然而骨骼是多种材料构成的复合体,在空间上非均匀分布,简单将骨骼划分为松质骨和密质骨难以精确反映骨头的真实应力状态。随着软件和实验技术的发展,基于CT图像灰度值对骨骼模型材料赋值成为目前股骨建模常用的材料赋值方法^[6-8]。张国栋等^[9-10]将股骨模型分别赋予2、10、20、50、100种材料属性后,通过计算比较发现,将股骨模型分别赋予10种材料属性可以较为准确反映股骨的真实应力状态。张思能等^[11]通过建立股骨有限元模型及应力分析,认为有限元模型的准确性与单元数目、计算机性能等密切相关,同时还要与临床、传统力学实验相结合。Viceconti等^[12]探讨不同网格划分方法对股骨头生物力学性能的影响,认为六面体网格模型比四面体和体素网格模型的计算精度高。Liang等^[13]比较单腿和双腿站立情况下各向同性材料模型和正交各向异性模型的Von Mises应力和最大节点位移,认为两种情况下计算结果差别较小。

本文基于螺旋CT图像,利用Mimics、3-Matic、ICEM、Hyper-Mesh和ABAQUS软件构建不同股骨上段有限元模型(体素网格、四面体网格和六面体网格),在验证股骨上段有限元模型有效性的基础上,通过应力、位移分布等比较单元尺寸对股骨上段有限元模型的影响。

1 材料与方法

1.1 CT数据获得

选取1名成年男性志愿者,无既往病史,用螺旋CT机对下肢以层厚0.6 mm扫描,得到股骨CT断层扫描图像,以DICOM标准格式保存。

1.2 几何模型提取

将股骨CT数据导入Mimics 10.0中,根据骨骼阈值生成股骨蒙板进行初步的三维重建,对蒙板进行开环、闭环操作去除数据噪声,得到外形精确的蒙板,并通过填充、光滑工具消除数据缺陷,得到股骨几何模型。

1.3 网格划分

1.3.1 体素网格 Mimics软件里体素网格生成工具可基于体素直接生成体六面体或四面体单元,基于体素的网格划分方法建立的网格单元尺寸以体素大小为单元,直接基于蒙板生成网格,生成股骨上段模型[见图1(a)]。

1.3.2 四面体网格 利用3-Matic软件对蒙板进行操作,重新划分网格,控制网格单元尺寸,并对面网格尺寸进行优化控制,提高面网格质量,由三角形面网格生成四面体网格模型[见图1(b)]。

1.3.3 六面体网格 将股骨上段几何模型导入ICEM软件中,建立几何模型和六面体块的映射关系,对块进行创建、分割、调整等操作后,再进行网格划分,然后映射到实体。最后进行网格检查,对不符合要求的网格进行优化、调整、自动修复。在ICEM中根据需要设置单元尺寸,生成网格单元尺寸分别为2、1和0.5 mm的股骨上段有限元模型[见图1(c)~(e)]。

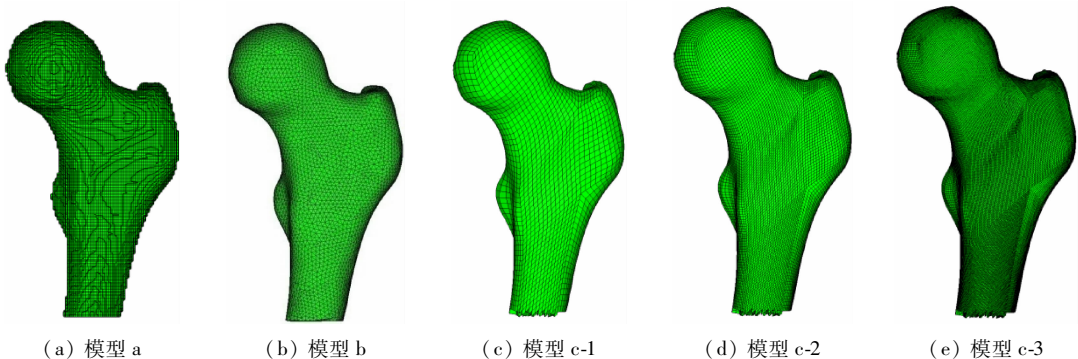


图1 股骨上段有限元网格模型

Fig.1 Finite element models of proximal femur (a) Model a, (b) Model b, (c) Model c-1, (d) Model c-2, (e) Model c-3

1.4 材料赋值

将模型文件以 inp 格式导入 Mimics, 基于 CT 断层图像的灰度值, 利用以下经验公式按 10 种材料属性对 5 个模型进行材料赋值^[10]:

$$\rho = -13.4 + 1.017HU \quad (1)$$

$$E = -388.8 + 5.929\rho \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度 (g/m^3); HU 为 CT 图像文件的灰度值; E 为材料弹性模量 (Pa)。

模型中任意节单元的灰度值 HU_n 通过单元内求平均, 单元内平均化后 CT 值为^[7]:

$$\overline{HU_n} = \left(\int_V h(x, y, z) dV \right) / \int_V dV \quad (3)$$

式中: $h(x, y, z)$ 为单元内任意一点的灰度值; V 为单元体积。式(3)表明, 某单元的材料属性不仅与划分材料的种类有关, 也与单元的体积有关。材料赋值后的模型如图 2 所示。

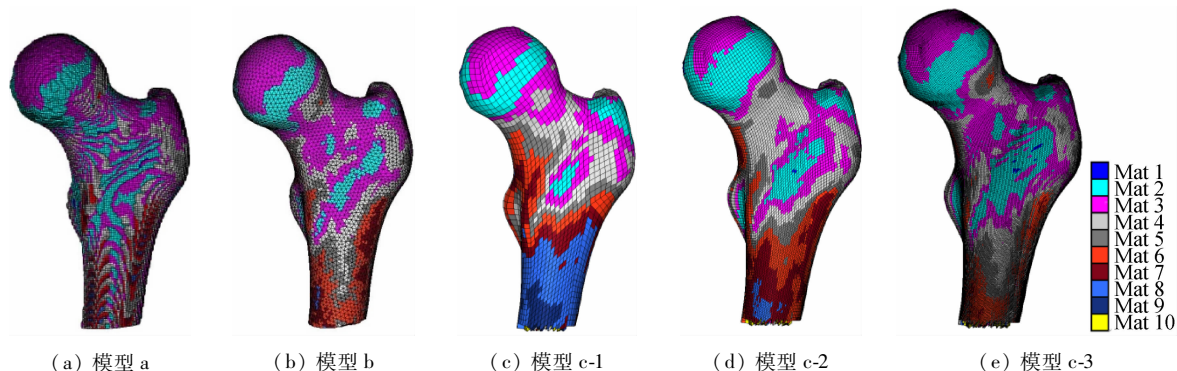


图 2 股骨模型的材料分布图

Fig. 2 Materials distributions of proximal femur (a) Model a, (b) Model b, (c) Model c-1, (d) Model c-2, (e) Model c-3

表 1 模型验证

Tab. 1 Validation of the models

E_{33}	模型编号					
	文献[14]	模型 a	模型 b	模型 c-1	模型 c-2	模型 c-3
max	0.001 53	0.001 36	0.000 85	0.000 76	0.000 97	0.001 16
min	-0.001 94	-0.002 63	-0.001 53	-0.001 71	-0.002 15	-0.002 33

2.2 材料赋值结果

5 个模型的总质量分别为 214.1、206.4、208.3、203.2、203.2 g。由图 3(a)、(b) 可见, 模型 c-3 与模型 a 中各材料质量百分比和体积百分比最为接近。

2.3 有限元分析结果

5 个股骨上段有限元模型在相同边界和载荷条件下的 Von Mises 应力分布如图 4 所示。5 个模型

1.5 载荷及边界条件

根据张国栋等^[9]的研究结果, 将模型下端固定, 限制 6 个方向的自由度, 在股骨头顶部选择直径 3 cm 区域的所有节点, 施加 1 kN 的合力, 方向竖直向下。5 个模型设置相同的边界条件和载荷。

2 结果

2.1 有效性验证

根据张国栋等^[10]研究结果, 股骨上段有限元模型 Von Mises 应力范围为 0 ~ 50 MPa; 本文研究结果表明, 5 个模型的 Von Mises 应力范围为 0 ~ 35 MPa; 根据 Zohar 等^[14]研究结果, 本文比较了 5 个模型竖直方向正应变的最大和最小值(见表 1)。由应力和应变范围的比较可知, 本文所建 5 个模型的应力和应变水平与文献[10]、[14]中的研究结果一致。

Von Mises 应力分布一致, 股骨距部位 Von Mises 应力值较大, 图中的应力分布和应力水平与张国栋等^[10]的研究结果一致。

由 5 个股骨上段有限元模型在相同边界条件和载荷条件的位移分布(见图 5)可知, 其最大位移发生位置相同, 最大值分别为 0.381、0.374、0.407、0.399、0.396 mm。

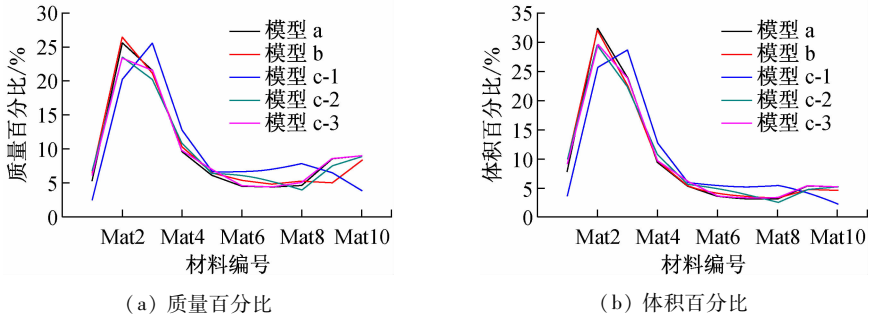


图3 模型材料赋值结果

Fig. 3 Results of material assignment for models (a) Mass percentage, (b) Volume percentage

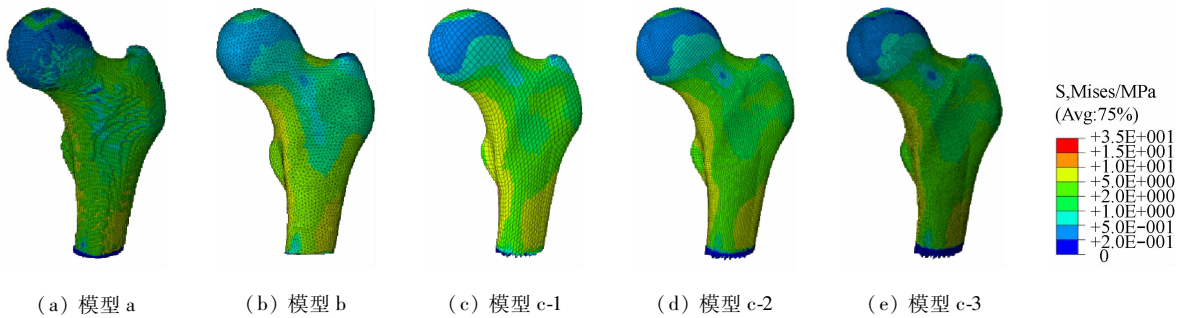


图4 股骨上段应力云图

Fig. 4 Stress distributions on proximal femur (a) Model a, (b) Model b, (c) Model c-1, (d) Model c-2, (e) Model c-3

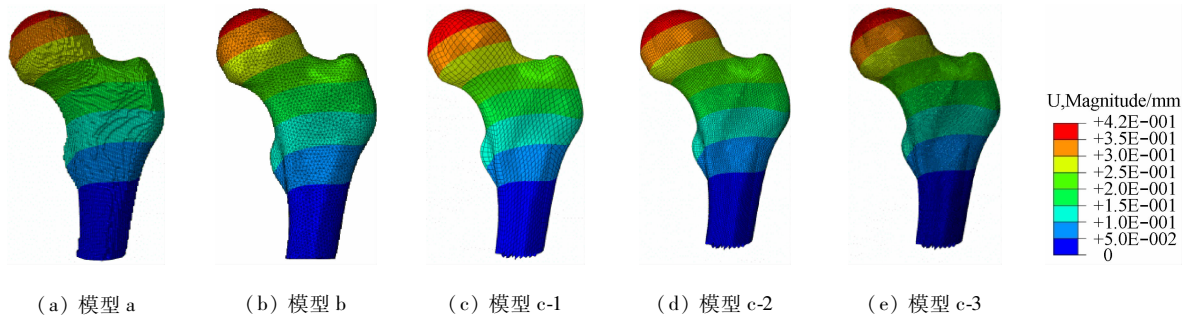


图5 股骨上段位移云图

Fig. 5 Displacement distribution on proximal femur (a) Model a, (b) Model b, (c) Model c-1, (d) Model c-2, (e) Model c-3

从股骨小转子到股骨头上选择一路径,并在不同模型上选择该路径上相同位置的23个节点,比较节点处 Von Mises 应力与位移(见图6)。在相同边界和载荷条件下,5个模型沿该路径上各节点处 Von Mises 应力与位移变化趋势一致。从小转子到股骨

头, Von Mises 应力先增大后减小(最大、最小应力分别为10、1.1 MPa),节点位移逐渐增大(从0.12 mm到0.29 mm),然而各节点处 Von Mises 应力偏差较大,单元尺寸为0.5 mm的六面体网格模型(模型c-3)与体素网格模型(模型a)应力较为一致。

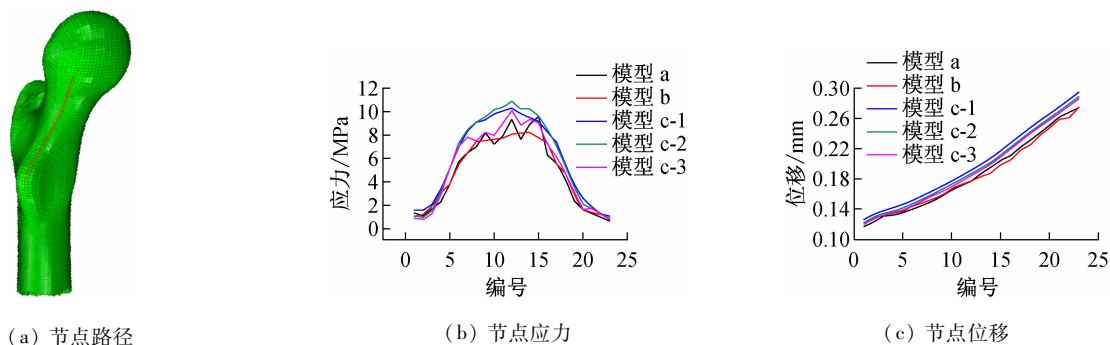


图6 节点应力与位移

Fig.6 Nodal stress and nodal displacement (a) Nodal path, (b) Nodal stress, (c) Nodal displacement

3 讨论

在股骨有限元建模过程中,基于 CT 图像的灰度值进行材料赋值时,任意单元的材料属性取决于该单元的单元内平均化灰度值,故单元尺寸越大,每个单元内灰度值取平均后,整个模型中灰度值较大的网格数目和灰度值较小的网格数目就会减少。通过对 5 个模型总质量和各材料质量的比较可以发现,单元尺寸对模型的总质量影响较小(质量误差为 5%),然而随着网格细化和单元体积的减小,模型中弹性模量较小的材料(Mat1、Mat2)和弹性模量较大的材料(Mat9、Mat10)质量增加。体素是 CT 图像的最小单位,反映了体素所在位置的灰度值,可以认为体素网格模型能够较为准确地反映股骨的材料分布。因此,本文将其他模型与体素网格模型进行比较,单元尺寸为 0.5 mm 的六面体网格模型(模型 c-3)中各材料的质量百分比和体积百分比与体素网格模型最为接近(质量百分比最大差值为 2.2%)。

比较 5 个模型在相同路径上各节点的位移可以看出,5 个模型在相同路径线上的节点位移变化一致(最大误差为 10%),说明单元尺寸对模型的整体刚度和节点位移影响较小。比较 5 个模型在相同路径上各节点处的 Von Mises 应力可以看出,虽然 5 个模型沿路径线上的节点处 Von Mises 应力变化趋势整体一致,然而各点处 Von Mises 应力有一定差异。对比模型 c-1、c-2、c-3 可以看出,随着网格细化和单元体积的减小,各点处 Von Mises 应力减小,单元尺寸为 0.5 mm 的六面体网格模型(模型 c-3)与体素

网格模型(模型 a)各点处 Von Mises 应力最为接近。四面体网格模型(模型 b)相较于其他网格模型,在各节点处应力差值加大,导致这种误差的原因包括:网格划分方法不同导致的节点位置误差,四面体网格模型本身计算精度较差、容易导致单元畸变等。

需要指出的是,虽然体素网格模型以 CT 图像的体素作为基本的网格单元,能够比较准确反映股骨的质量分布,然而体素网格模型的表面不够光滑,尤其对于几何形状比较复杂的骨头,难以精确反映骨头形状,而且容易引起计算不收敛^[15]。由于六面体网格模型比四面体网格模型计算精度高,计算稳定性好^[15],随着建模和网格划分技术的成熟,六面体网格模型的应用将越来越广泛^[16-17]。本文中当六面体网格模型单元尺寸接近体素尺寸时,能够比较准确反映股骨的质量分布和力学行为。

4 结论

本文基于螺旋 CT 图像,利用 Mimics、3-Matic、ICEM 等软件构建 5 个不同的股骨上段有限元模型(体素网格模型、四面体网格模型和六面体网格模型),并在 ABAQUS 中进行受力分析,讨论单元尺寸对模型材料分布和力学行为的影响。结果表明,单元尺寸对模型的总质量、整体刚度和节点位移影响较小,但是随着网格的细化和单元体积的减小,单元尺寸的变化将引起模型中各材料含量和材料分布的变化,进而导致局部应力的改变;当模型单元尺寸接近体素尺寸时,模型能够较为准确地反映股骨的材料分布和力学行为。

参考文献:

- [1] 邹冬华, 李正东, 黄平, 等. 股骨有限元模型的建立及损伤生物力学验证[J]. 法医学杂志, 2011, 27(4): 241-245.
- [2] Neugebauer R, Werner M, Voigt C, *et al.* Experimental modal analysis on fresh-frozen human hemipelvic bones employing a 3D laser vibrometer for the purpose of modal parameter identification [J]. *J Biomech*, 2011, 44(8): 1610-1613.
- [3] 雷建银, 刘海波, 王志华, 等. 站立位下骨盆与骨折内固定稳定性分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 517-523.
Lei JY, Liu HB, Wang ZH, *et al.* 2014. Stability analysis of the pelvis and fracture fixation in standing position [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(6): 517-523.
- [4] 姜海波, 葛世荣. 基于 CT 扫描人体股骨的有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 156-159.
- [5] El' Sheikh HF, Macdonald BJ, Hashmi MJ. Finite element simulation of the hip joint during stumbling: A comparison between static and dynamic loading [J]. *J Mater Process Tech*, 2003, 143-144(1): 249-255.
- [6] 王惊, 李元超, 汪方, 等. 人体松质骨矿物质密度与弹性模量关系[J]. 医用生物力学, 2014, 29(5): 465-470.
WANG J, LI YC, WANG F, *et al.* Relationship between mineral density and elastic modulus of human cancellous bone [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(5): 465-470.
- [7] Taddei F, Pancanti A, Viceconti M. An improved method for the automatic mapping of computed tomography numbers onto finite element models [J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26(1): 61-69.
- [8] 覃勇, 樊继波, 李莎, 等. 股骨上段有限元几何模型的建立与分析[J]. 中国骨质疏松杂志, 2012, 18(4): 305-308.
- [9] 张国栋, 廖维靖, 陶圣祥, 等. 股骨有限元分析赋材料属性的方法[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(43): 8436-8441.
- [10] 张国栋, 廖维靖, 陶圣祥, 等. 股骨颈有限元分析的赋材料属性方法探讨及有效性验证[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(52): 10263-11026.
- [11] 张思能, 黄潮桐, 陈隆福, 等. 股骨生物力学有限元分析研究进展[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2013, 5(6): 368-373.
- [12] Marco V, Luisella B, Luca C, *et al.* A comparative study on different methods of automatic mesh generation of human femur [J]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(1): 1-10.
- [13] Peng L, Bai J, Zeng XL, *et al.* Comparison of isotropic and orthotropic material property assignments on femoral finite element models under two loading conditions(2) [J]. *Med Eng Phys*, 2006, 28(3): 227-233.
- [14] Zohar Y, Nir T, Milgrom C. Reliable simulations of the human proximal femur by high-order finite element analysis validated by experimental observations [J]. *J Biomech*, 2007, 40(16): 3688-3699.
- [15] Lengsfeld MP. Comparison of geometry based and CT voxel based finite element modelling and experimental validation [J]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(7): 515-522.
- [16] 彭亮, 曾小丽, 白净. 基于 CT 数据的股骨三维有限元建模方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(3): 416-419.
- [17] 尚禹, 彭亮, 刘加成, 等. 均匀材料和基于 CT 灰度值材料的股骨-胫骨有限元分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(5): 722-727.
- [16] 韩磊, 唐国华. 牵张应力特征和成骨细胞生物学效应的体外研究现状[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2009, 7(2): 184-189.
- [17] 邱小忠, 李小娜, 陈维毅, 等. 周期性机械拉伸对 C₂C₁₂ 成肌细胞增殖的影响[J]. 中国临床解剖学杂志, 2006, 24(2): 183-185.
- [18] Ahlborg L, Andersson C, Julin P. Whole-body vibration training compared with resistance training: Effect on spasticity, muscle strength and motor performance in adults with cerebral palsy [J]. *Rehabil Med*, 2006, 38(5): 302-308.
- [19] 公小娟, 刘畅, 姜丁文, 等. 振动运动对大鼠骨骼肌 AMPK-GLUT4 糖代谢通路的影响[J]. 中国临床解剖学杂志, 2013, 31(3): 293-298.
- [20] 王洪玲, 刘东旭, 袁晓. 周期性张应力对 C₂C₁₂ 成肌细胞增殖的影响[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(20): 3242-3245.

(上接第 116 页)