

文章编号:1004-7220(2022)01-0027-06

股骨头坏死松质骨生物力学特征的空间分布规律

冯成龙^a, 杨贤达^a, 冯文韬^a, 王丽珍^{a*}, 樊瑜波^{a,b*}

(北京航空航天大学 a. 生物与医学工程学院 生物力学与力生物学教育部重点实验室,
北京市生物医学工程高精尖创新中心;b. 医学科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:目的 探究股骨头坏死松质骨微观结构参数和力学性能的空间分布规律,为临床诊断中科学评估病灶对病情的影响提供理论依据。方法 结合影像学测量和数值模拟方法,定量分析不同区域松质骨的微观结构参数和力学性能,分别从冠状面、矢状面和水平面投影方向上探究松质骨生物力学特征的空间分布特点。结果 在股骨头冠状面和矢状面投影方向上,松质骨的微观结构特征与力学性能大致呈 Y 型分布,Y 形区域内松质骨的力学性能高于其他区域,该分布特点与股骨头内的主压应力束的位置相吻合。结论 位于股骨头 Y 形区域内的坏死灶对股骨头内应力分布的影响程度会更大,更有可能导致病情恶化。临床诊断中应充分考虑坏死灶和 Y 形区域的位置关系。

关键词:股骨头坏死; 松质骨; 微观结构参数; 力学性能; 空间分布

中图分类号:R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.01.004

Spatial Distribution of Biomechanical Characteristics for Trabecular Bone in the Femoral Head with Osteonecrosis

FENG Chenglong^a, YANG Xianda^a, FENG Wentao^a, WANG Lizhen^{a*}, FAN Yubo^{a,b*}

(a. Beijing Advanced Innovation Centre for Biomedical Engineering, Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering; b. School of Engineering Medicine, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Objective To explore the spatial distribution of microstructural parameters and mechanical properties for trabecular bone in the femoral head with osteonecrosis. **Methods** Microstructural parameters and mechanical properties of trabecular bone in different regions were analyzed by combined use of imaging measurements and numerical simulation method, and the spatial distribution of biomechanical properties for trabecular bone along coronal, sagittal and vertical directions was investigated. **Results** Microstructural characteristics and mechanical properties of trabecular bone were Y-shaped distributed along coronal and sagittal directions, and mechanical properties of trabecular bone in Y-shaped region were higher than those in the other regions. Such distribution characteristics was consistent with the location of principle compressive group in the femoral head. **Conclusions** Necrotic lesions in Y-shaped region had a greater influence on stress distribution of the femoral head and might cause the deterioration of osteonecrosis. The spacial correlation between necrotic lesions and Y-shaped region should be fully considered during clinical diagnosis.

Key words: osteonecrosis of the femoral head (ONFH); trabecular bone; microstructural parameters; mechanical properties; spatial distribution

收稿日期:2021-04-01; 修回日期:2021-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(11822201)

通信作者:樊瑜波,教授,博士生导师,E-mail:yubofan@buaa.edu.cn;王丽珍,教授,博士生导师,E-mail:lizhenwang@buaa.edu.cn

*为共同通信作者

股骨头坏死(osteonecrosis of the femoral head, ONFH)是一种常见的骨科疾病,具有渐进性和致残性的特点^[1]。坏死的股骨头通常在患者的壮年时期就会发生变形乃至塌陷等症状,导致髋关节运动功能丧失,给患者生活与工作带来极大不便^[2]。

坏死灶范围和位置对 ONFH 自然病程进展有极大的影响^[3-4]。目前常用的分期与分型诊断方法中大都包含对坏死灶范围与位置的测量,并以此作为同期病例病情轻重分型的依据^[5-6]。然而这些研究大多基于传统的病理学研究方法和对临床病例病症的归纳总结,忽略了坏死灶的形态特征与松质骨结构病变之间的关系。ONFH 进展过程伴随着松质骨结构的显著变化。在早期 ONFH 患者中,坏死的只是小部分的骨组织,在局部范围内造成了松质骨结构的变形与缺失^[2, 7]。但这种结构的微小变化却改变了股骨头内部的力学环境,影响骨重建的过程,从而加剧松质骨结构的病变^[8-9]。在这个不断恶化的过程中,股骨头内应力水平逐渐提高,而松质骨的整体力学性能却在不断下降,这或许是导致股骨头变形与塌陷的主要因素^[10]。因此,松质骨微观结构参数和力学性能是探究 ONFH 及股骨头塌陷过程生物力学机制的重要指标,坏死股骨头中松质骨生物力学特征的空间分布规律在改进 ONFH 临床诊断方法、优化治疗方案等方面具有十分重要的临床参考价值。

本文根据股骨头中主压应力束和主拉应力束的空间位置特点,提出股骨头三维结构的区域划分方法;基于该局域划分方法,定量分析不同区域松质骨的微观结构参数与力学性能,并探究松质骨生物力学特征的空间分布规律。研究结果为探究 ONFH 和股骨头塌陷过程的生物力学机制提供理论基础。

1 材料和方法

所使用的7个股骨头样本均由中日友好医院提供。7个股骨头样本取自7位接受全髋关节置换手术的 ONFH 患者。依据国际骨循环研究会分期诊断系统的标准,7个股骨头均属于坏死Ⅲ期阶段。

1.1 区域划分与分组

股骨头中骨小梁的排列方向较为规整,在冠状

剖面上可以区分出主压应力束和主拉应力束[见图1(a)]。根据两个应力束的方向与位置,在冠状面投影方向上,将股骨头分成9组[见图1(b)],随后在三维方向上进一步将股骨头划分为27个区域[见图1(c)],并分别从冠状面投影(前后)、矢状面投影(内外)、水平面投影(上下)3个方向探究松质骨生物力学特征的空间分布规律。

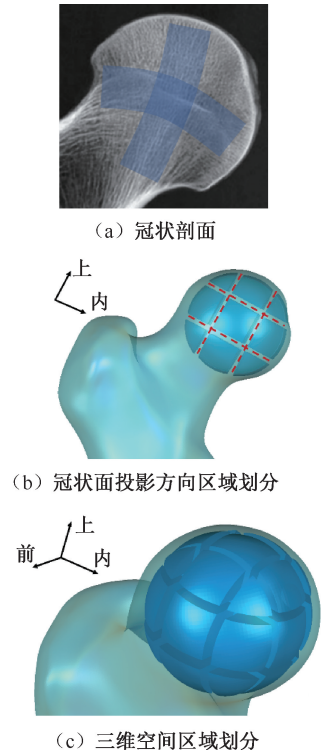


图1 股骨头区域划分方法示意图

Fig.1 Schematic of regional division method of the femoral head (a) Coronal section, (b) Regional division along the coronal direction, (c) Regional division of three-dimensional view

1.2 影像学测量微观结构参数

使用 SkyScan-1076 型 Micro-CT 扫描设备扫描股骨头样本,扫描与成像精度为 35 μm 。分别在股骨头的 27 个分区内选取兴趣区域(region of interest, ROI)。ROI 为立方体区域,边长 5 mm。使用 CTAn 软件计算 ROI 松质骨的微观结构参数,包括骨体积分数(bone volume fraction, BV/TV)和结构模型指数(structural model index, SMI)。

1.3 数值模拟计算松质骨表现力学性能

使用 Simpleware 软件将 ROI 区域的扫描断面

图重建为三维模型,并进行网格划分(C3D4)。将网格模型导入 ABAQUS 软件定义材料的力学属性。骨小梁材料线弹性变形阶段的弹性模量为 10 GPa,骨组织的泊松比为 0.3^[11]。当骨小梁应力达到屈服点以后进入塑性变形范围,定义弹性模量为线弹性变形阶段 5%。拉伸变形过程中应变为 0.48% 时即达到屈服点,而在压缩变形过程中屈服点为应变达到 0.8% 处^[12]。模型下端面固定,限定节点 3 个方向的位移和旋转;在模型上端面施加垂直向下的位移,1.2% 总应变量被均匀地施加在 12 个分析步中,以此来模拟松质骨在受压时的变形过程^[13]。有限元模型边界条件及应力分布如图 2 所示。

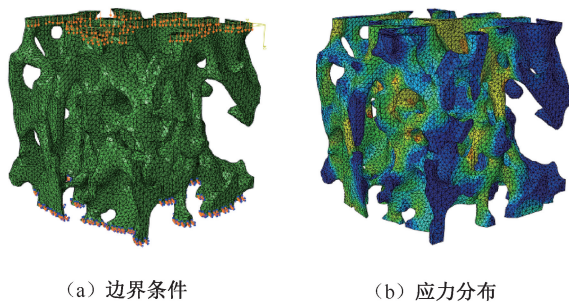


图 2 松质骨模型加载及应力分布

Fig.2 Loading and stress distributions on the model of trabecular bone (a) Boundary conditions, (b) Stress distributions

提取 12 个分析步中加载面的反作用力数据,根据样本截面积尺寸与加载方向长度计算相应的应力和应变,并绘制压缩过程的应力-应变曲线。表观弹性模量(E)为应力-应变曲线中线性段的斜率;经过 0.2% 点并且平行于线性变形段的直线与应力-应变曲线的交点则是屈服点,该点对应的应力即为屈服强度(σ)。

2 结果

2.1 冠状面投影方向微观结构参数和表观力学性能的空间分布规律

冠状面投影方向上,松质骨微观结构参数和表观力学性能见表 1。最大 BV/TV (33.45%) 和最小 SMI (1.89) 均位于中侧靠上的区域,最大弹性模量 (1 974.07 MPa) 和屈服强度 (13.10 MPa) 也位于该处。通过 MATLAB 软件绘制微观结构参数和表观力学性能的空间分布,其中特征点数值

由实验数据获取并导入,连续分布效果通过 3D Mesh 模块中的插值算法实现。冠状面投影方向上微观结构参数和表观力学性能的空间分布规律如图 3 所示。

表 1 冠状面投影方向微观结构参数和表观力学性能对比

Tab.1 Comparison of microstructural parameters and mechanical properties along the coronal direction

方向		BV/TV/%	SMI	E /MPa	σ /MPa
内侧	上	17.63±5.97	2.57±0.38	201.38±139.78	1.41±0.98
	中	15.29±7.10	2.55±0.24	347.29±210.50	2.22±1.36
	下	8.58±3.02	2.95±0.31	109.83±75.43	0.73±0.44
中侧	上	33.45±10.25	1.89±0.68	1 974.07±851.68	13.10±5.70
	中	26.14±14.09	2.25±0.60	1 665.21±1510.81	11.24±10.90
	下	21.84±14.44	2.68±0.52	1 664.25±1205.18	11.10±8.28
外侧	上	28.44±13.48	1.99±0.75	1 433.02±989.17	9.37±6.42
	中	18.49±6.27	2.98±0.33	486.83±255.08	2.94±1.58
	下	16.78±6.17	3.11±0.30	519.60±442.08	3.57±3.13

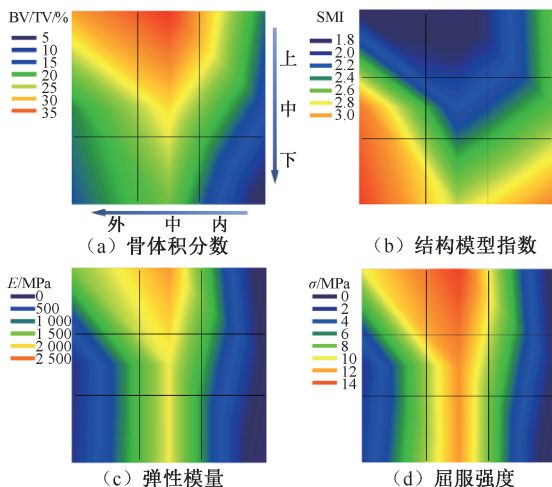


图 3 冠状面投影方向上松质骨生物力学特征空间分布规律

Fig.3 Spatial distribution of biomechanical characteristics for trabecular bone along the coronal direction (a) Bone volume fraction, (b) Structural model index, (c) Elastic modulus, (d) Yield strength

2.2 矢状面投影方向上微观结构参数和表观力学性能的空间分布规律

矢状面投影方向上松质骨微观结构参数和表观力学性能见表 2 所示。最大 BV/TV (28.17%)、弹性模量 (1 546.63 MPa) 和屈服强度 (10.35 MPa) 均位于上侧的中间区域。矢状面投影方向上微观结构参数和表观力学性能的空间分布规律如图 4 所示。

表2 矢状面投影方向微观结构参数和表观力学性能对比

Tab.2 Comparison of microstructural parameters and mechanical properties along the sagittal direction

方向	BV/TV/%	SMI	E/MPa	σ /MPa	
上侧	前	27.07±12.84	2.12±0.66	1 010.56±1161.82	6.45±7.21
	中	28.17±13.89	2.13±0.85	1 546.63±1088.32	10.35±7.18
	后	24.28±9.67	2.20±0.53	1051.27±857.49	7.08±6.07
中侧	前	21.00±5.55	2.55±0.36	740.34±561.34	4.69±3.77
	中	25.25±14.56	2.40±0.66	1 413.11±1569.78	9.53±11.32
	后	13.66±6.23	2.84±0.36	345.88±319.12	2.18±2.09
下侧	前	13.23±4.95	2.94±0.27	484.31±457.7	3.05±2.82
	中	20.78±15.04	2.85±0.61	1 259.81±1434.75	8.55±9.73
	后	13.18±7.66	2.96±0.32	549.55±600.06	3.80±4.18

表3 水平面投影方向微观结构参数和表观力学性能对比

Tab.3 Comparison of microstructural and mechanical parameters along the vertical direction

方向	BV/TV/%	SMI	E/MPa	σ /MPa	
内侧	前	17.12±7.02	2.50±0.29	293.12±222.22	1.98±1.42
	中	12.03±6.59	2.89±0.42	202.93±148.69	1.27±0.94
	后	12.35±5.63	2.69±0.26	162.44±137.00	1.12±0.90
中侧	前	23.28±11.20	2.44±0.55	1 268.05±971.93	7.90±6.24
	中	39.72±8.85	1.86±0.75	2 900.17±970.66	19.92±7.01
	后	18.42±10.92	2.53±0.52	1135.30±782.22	7.61±5.55
外侧	前	20.90±11.24	2.68±0.76	674.03±720.32	4.31±4.54
	中	22.45±11.30	2.63±0.68	1 116.45±913.33	7.23±5.94
	后	20.36±9.26	2.78±0.71	648.96±588.61	4.33±4.25

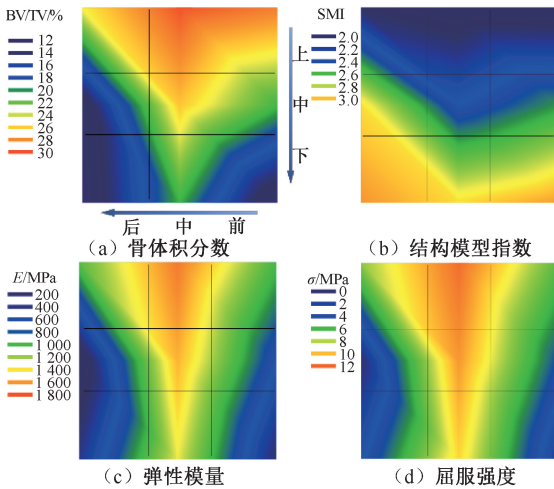


图4 矢状面投影方向上松质骨生物力学特征的空间分布规律

Fig.4 Spatial distribution of biomechanical characteristics for trabecular bone along the sagittal direction (a) Bone volume fraction, (b) Structural model index, (c) Elastic modulus, (d) Yield strength

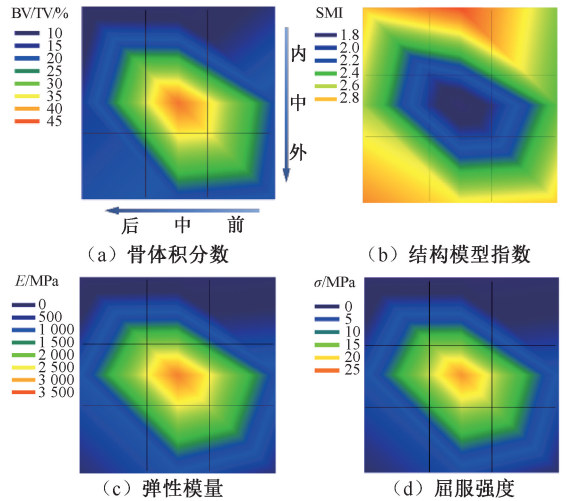


图5 水平面投影方向上松质骨生物力学特征的空间分布规律

Fig.5 Spatial distribution of biomechanical characteristics for trabecular bone along the vertical direction (a) Bone volume fraction, (b) Structural model index, (c) Elastic modulus, (d) Yield strength

2.3 水平面投影方向上微观结构参数和表观力学性能分布规律

水平面投影方向上松质骨微观结构参数和表观力学性能均值如表3所示。最大BV/TV(39.72%)和最小SMI(1.86)均位于正中心区域,最大弹性模量和屈服强度也位于该处($E=2\ 900.17\ \text{MPa}$, $\sigma=19.92\ \text{MPa}$)。水平面投影方向上微观结构参数和表观力学性能的空间分布规律如图5所示。

3 讨论

人体骨骼具有功能适应性的特点,不论是骨骼整体的几何特征,还是松质骨的微观形态学特点,都与其所承担的力学功能相匹配^[14-15]。股骨头内

松质骨在各种运动过程所承受的载荷形式主要为拉应力与压应力,健康股骨头中松质骨的微观形态特点与这种载荷相匹配,其骨小梁排列有序,形成了主压应力束和主拉应力束。两道应力束互相垂直,在冠状面上形成十字形区域^[16-17]。本文据此提出股骨头三维结构的区域划分方法,在内外、上下、前后平行于应力束的方向分别进行三等分切割,从而将股骨头的三维结构分成27个不同区域,并分别从冠状面、矢状面和水平面的3个投影方向上探究松质骨微观结构特征和力学性能的空间分布规律。

在股骨头的冠状面的投影方向上,BV/TV的空间分布大致呈Y型,且由上向下、由中间向两侧依

次递减。SMI 的空间分布也呈现 Y 型,只是数值增减规律与 BV/TV 相反。BV/TV 反映了区域内骨组织的相对含量,而 SMI 代表骨小梁单元的几何形态特征。当 SMI=3 时,表示物体几何形态为标准圆杆状;当 SMI=0 时,表示物体几何形态为标准的平板状,而板状骨小梁单元的力学承载能力也更强^[18-19]。因此,与其他区域相比,Y 形区域中松质骨的结构特点更适合负载。根据骨结构功能适应性的特点可以推断,在日常生活中股骨头冠状面 Y 形区域内的松质骨承受更多载荷。弹性模量表示材料或结构抵抗变形的能力,而屈服强度则是结构整体在承受载荷时发生塑性变形的临界点,这两个参数是衡量力学表现时最常用的指标。Y 形区域内松质骨的表现弹性模量和屈服强度高于其他区域,表明该区域松质骨在受载后抵抗变形的能力要强于其他区域,这与微观结构特征的结果相一致;并且,该 Y 型分布规律与主压应力束的位置相吻合。

在矢状面的投影方向上,松质骨微观结构特征和力学性能也大致呈 Y 型分布,只是在前后方向上更为对称;而冠状面上,Y 形的开口则偏向外侧。这是因为在日常生活中,髋关节的运动幅度在前后方向基本相同,但髋关节外展的运动状态比内收多。在水平面的投影方向上,松质骨力学性能由中心向四周递减。结合以上特点可以推断,坏死股骨头中松质骨的生物力学特征在三维方向上呈倒圆锥状分布,圆锥内侧骨组织含量高于外侧,且力学性能更高。

临床通常采用股骨头冠状面的影像学检测结果辅助 ONFH 的分期与分型,通过坏死灶的影响范围与位置判断病情的轻重。本文发现,冠状面投影 Y 形区域内松质骨的骨组织含量更高,并且在日常运动过程中承担更多的载荷。因此,当坏死灶位于 Y 形区域内时,其对股骨头应力环境将造成更大的影响,也更有可能导致病情的恶化。在 ONFH 的临床诊断过程中,应充分考虑松质骨生物力学特征的空间分布规律。

本文探究了坏死股骨头微观结构特征和力学性能的空间分布规律。根据国际骨循环研究会分期诊断标准,所使用的股骨头样本均处于坏死 III 期阶段。坏死股骨头中松质骨的微观结构特征与健康股骨头有较大差异。健康股骨头样本中松质骨

的 BV/TV 为 25.04% ~ 52.02%, SMI 为 -0.20 ~ 1.82^[20];而本文结果显示,坏死股骨头松质骨的 BV/TV 为 8.58% ~ 39.72%, SMI 为 1.86 ~ 3.11。与健康股骨头相比,坏死股骨头中松质骨的 BV/TV 明显更低,骨小梁形态也更接近于杆状,表明股骨头中松质骨的微观结构特征随着病情进展已经发生较大的改变。因此,本研究中松质骨生物力学特征的空间分布规律并不能适用于健康股骨头,健康股骨头样本中松质骨微观结构特征和力学性能分布特点仍有待验证。

4 结论与展望

本文结合影像学和数值模拟方法,定量分析坏死股骨头中松质骨的微观结构特征和力学性能,探究松质骨生物力学特征的空间分布规律。在股骨头的冠状面和矢状面投影方向上,松质骨的微观结构特征与力学性能大致呈 Y 型分布,Y 形区域内骨组织含量更高且力学性能更强。位于 Y 形区域内的病灶会对股骨头内的应力分布情况造成更大影响,故也更有可能导致病情恶化。

本文主要针对股骨头坏死松质骨微观结构及力学性能进行测量,坏死股骨头样本均取自国际骨循环研究会分期标准中的 III 期患者,缺乏其他病程阶段的样本进行对照。ONFH 的自然病程较长,松质骨生物力学特征在不同的病理阶段中可能会有不同的分布特点。在将来的工作中可以补充不同样本,从而探究松质骨微观结构特征与力学性能的空间分布规律随着病情进展的变化情况。

参考文献:

- [1] STEINBERG DR, STEINBERG ME. Osteonecrosis: An overview [J]. *Tech Orthop*, 2008, 23(1): 2-10.
- [2] JONES LC, HUNGERFORD DS. Osteonecrosis: Etiology, diagnosis, and treatment [J]. *Curr Opin Rheumatol*, 2004, 16(4): 443-449.
- [3] KERBOUL M, THOMINE J, POSTEL M, et al. The conservative surgical treatment of idiopathic aseptic necrosis of the femoral head [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1974, 56(2): 291-296.
- [4] STEINBERG ME, STEINBERG DR. Classification systems for osteonecrosis: An overview [J]. *Orthop Clin N Am*, 2004, 35(3): 273-283.
- [5] 李子荣,王卫国,张启栋,等. 基于三柱结构的股骨头坏死

- 分型——中日友好医院分型[J]. 中华骨科杂志, 2012, 32(6): 515-520.
- [6] SUN W, LI ZR, WANG BL, *et al.* Relationship between preservation of the lateral pillar and collapse of the femoral head in patients with osteonecrosis [J]. Orthopedics, 2014, 37(1): 24-28.
- [7] NAKAI T, MASUHARA K, NAKASE T, *et al.* Pathology of femoral head collapse following transtrochanteric rotational osteotomy for osteonecrosis [J]. Arch Orthop Traum Surg, 2000, 120(9): 489-492.
- [8] DANIEL M, HERMAN S, DOLINAR D, *et al.* Contact stress in hips with osteonecrosis of the femoral head [J]. Clin Orthop Relat R, 2006, 447: 92-99.
- [9] MONT MA, ZYWIEL MG, MARKER DR, *et al.* The natural history of untreated asymptomatic osteonecrosis of the femoral head; A systematic literature review [J]. J Bone Joint Surg Am, 2010, 92(12): 2165-2170.
- [10] BROWN TD, BAKER KJ, BRAND RA. Structural consequences of subchondral bone involvement in segmental osteonecrosis of the femoral head [J]. J Orthop Res, 1992, 10(1): 79-87.
- [11] FENG C, YAO J, WANG L, *et al.* Idealized conductance: A new method to evaluate stiffness of trabecular bone [J]. Int J Numer Meth Bio, 2021, 37(3): e3425.
- [12] GONG H, WANG L, FAN Y, *et al.* Apparent-and tissue-level yield behaviors of L4 vertebral trabecular bone and their associations with microarchitectures [J]. Ann Biomed Eng, 2016, 44(4): 1204-1223.
- [13] GONG H, ZHANG M, FAN Y. Micro-finite element analysis of trabecular bone yield behavior: Effects of tissue nonlinear material properties [J]. J Mech Med Biol, 2011, 11(3): 563-580.
- [14] COWIN SC. Wolff ' s law of trabecular architecture at remodeling equilibrium [J]. J Biomech Eng, 1986, 108(1): 83-88.
- [15] HUISKES R, RUIJMERMAN R, LENTHE G, *et al.* Effects of mechanical forces on maintenance and adaptation of form in trabecular bone [J]. Nature, 2000, 405(6787): 704-706.
- [16] FROST HM. Wolff ' s law and bone ' s structural adaptations to mechanical usage: An overview for clinicians [J]. Angle Orthod, 1994, 64(3): 175-188.
- [17] MEYER G. The classic: The architecture of the trabecular bone (tenth contribution on the mechanics of the human skeletal framework) [J]. Clin Orthop Relat R, 2011, 469(11): 3079.
- [18] MITTRA E, RUBIN C, GRUBER B, *et al.* Evaluation of trabecular mechanical and microstructural properties in human calcaneal bone of advanced age using mechanical testing, μ CT, and DXA [J]. J Biomech, 2008, 41(2): 368-375.
- [19] WANG J, ZHOU B, LIU X, *et al.* Trabecular plates and rods determine elastic modulus and yield strength of human trabecular bone [J]. Bone, 2015, 72: 71-80.
- [20] 彭江, 汪爱媛, 孙明学, 等. 股骨头松质骨样本空间结构的三维分析[J]. 中国矫形外科杂志, 2005, 13(12): 924-926.