

股骨头缺血性坏死相关生物力学研究进展

陈雷雷¹, 何伟²

(1. 广州中医药大学博士研究生, 广东 广州 510405; 2. 广州中医药大学第一附属医院髋关节中心, 广东 广州 510405)

【摘要】 股骨头缺血性坏死是一种临床常见的骨科疾病, 病情发展迅速, 预后较差, 是医学界公认的治疗难题。在股骨头缺血性坏死病程发展及治疗中, 生物力学因素起着重要的作用。本文对股骨头缺血性坏死症状、影像学、塌陷、预测塌陷、保髋治疗等方面的相关生物力学国内外研究现状做一综述。

【关键词】 股骨头坏死; 生物力学; 综述文献

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2011.02.024

Advances in biomechanical studies on osteonecrosis of the femoral head CHEN Lei-lei, HE Wei*. *Department of Hip-joint Disease, First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong, China

ABSTRACT Osteonecrosis of the femoral head is a common clinical orthopedic disease. The progression of the disease is rapid and the prognosis is poor. All the medical profession recognize it as one of the unresolved medical problems. Biomechanical factors play an important role in the course of progression and treatment of osteonecrosis of the femoral head. In this paper, we review the literature and introduce the advanced biomechanical studies on the symptoms, image, collapse, collapse prediction, preserving femoral head surgery of osteonecrosis of the femoral head.

KEYWORDS Femur head necrosis; Biomechanics; Review literature

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2011, 24(2): 174-177 www.zggszz.com

股骨头缺血性坏死(ONFH)后的一系列病理改变, 将导致髋关节的生物力学发生变化, 而生物力学的改变则进一步作用和影响着股骨头缺血坏死后塌陷的发生、发展以及转归。随着生物力学实验的发展及有限元模型研究的应用, ONFH 中生物力学因素越来越受到重视, 本文试对 ONFH 领域相关生物力学研究进行综述。

1 症状与头内稳定

ONFH 的临床症状主要表现为髋关节周围疼痛, 以腹股沟和臀部、大腿为主, 或出现膝关节内侧疼痛; 髋关节活动可无明显受限, 或仅有内旋时活动受限并疼痛加重; 抗疼痛步态; 一旦股骨头发生塌陷, 疼痛以及其他体征将更加明显。多数患者临床症状并不明显, 何伟等^[1]认为疼痛的出现意味着股骨头已经发生了塌陷, 或者头内出现局部断裂, 存在头内力学不稳定现象。塌陷后早期的疼痛相当敏锐, 并与负重直接相关, 因为头内存在不稳定的死骨, 在应力作用下可造成髓内瞬间压力迅速增加, 产生剧烈疼痛, 当应力解除或减小、或稳定性改善, 疼痛可以缓解甚至消失。若头内严重不稳定, 甚至出现所谓的“静息痛”。

2 影像与力学改变

MRI 是目前诊断 ONFH 最准确的影像学检查方法, 特别是在骨坏死早期阶段有骨髓改变时, 常规 MRI 对 ONFH 具有较高的敏感度和特异性(96%~99%)^[2-4]。早期股骨头坏死性病变, 典型 MRI 图像表现为低信号带(hypointense zone)和双线

征(double-line sign)。在组织形态学上被描述为软骨下区的多个相邻的坏死骨小梁被不同坏死期的骨髓组织包裹, 并有纤维血管性骨髓再生带、活跃的骨形成和改建, 使其与下方存活的骨和骨髓组织分隔。再血管化和骨吸收仅出现在坏死区域的边缘部分, 因而导致不完全修复。组织反应界面的不完全修复是该疾病不能逆转的关键, 也是影像诊断的首要条件^[5]。组织学上不充分的修复机制, 造成一血供丰富的肉芽组织及新骨形成带, 它邻近坏死灶周围的缺血区。存活骨与坏死骨之间的反应性界面(reactive interface)表示由周围存活组织向坏死区中央以修复已死亡的骨髓与骨小梁的初衷不尽人意。反应性界面周围形成的新骨, 筑起了一个特殊的硬化缘, 它支撑着软骨下骨, 以防过早的塌陷, X 线片可清晰显示围绕病灶的硬化缘。颇具特征的骨坏死在 X 线和 CT 片上表现为被典型的硬化缘所围绕的斑点状溶骨以及软骨下硬化性病变, 骨扫描则表现为“炸面包圈”征象^[6]。

骨髓水肿是与 ONFH 临床症状密切相关的重要影像学征象。骨髓水肿机制目前尚不明确, 早期 Ficat 等^[7]认为骨髓水肿可以由软骨下骨折或机械应力导致, 也可以由于髓内静脉淤滞导致。Daffner 等^[8]则认为 MRI 所示骨髓水肿可能是应力反应, 或者是症状不明显的应力骨折。Schweitzer 等^[9]的研究结果也表明 MRI 上信号增高可能是局部应力反应, 他们认为生物力学的改变可能是髓内 T2 加权像上信号增高的原因之一。Huang 等^[10]推测这种不正常的机械应力可能在骨髓水肿发展过程中起着重要作用。髋关节开始出现疼痛时, 坏死区骨小梁骨折导致异常应力分布, 应力改变将导致股骨颈、转子

通讯作者: 何伟 E-mail: hewei1123@21cn.com

间区活骨周围异常机械应力,最终使得周围骨髓水肿形成。另外,有许多研究推测骨髓水肿可能是机械应力所致软骨下骨折的继发反应^[11-13]。Shimizu 等^[14]曾报道 1 例股骨头局部坏死塌陷后,MR 由带状型号转变为周围骨髓水肿。Kim 等^[15]报道 MRI 所示骨髓水肿只有在软骨下骨折发生后才可观察到,他们认为骨髓水肿是软骨下骨折的继发改变,而股骨头内结构性破坏可能是出现骨髓水肿征象和疼痛症状进展的原因。Iida 等^[16]、Fujioka 等^[17]也认为骨髓水肿不是早期股骨头缺血的变化,而是机械应力和股骨头塌陷后的继发改变。Ito 等^[18]认为骨髓水肿反映了股骨头塌陷,而且也是疾病进程恶化的征象。何伟等^[19]认为股骨头坏死修复反应区的骨髓水肿是一种炎症反应表现,其产生机制可能与股骨头内微骨折有关。

3 塌陷与力学性能

股骨头坏死后塌陷是生物学和生物力学因素综合作用的结果^[20],坏死修复过程中,生物学反应导致生物力学性能显著下降,尤其软骨下骨力学性能的(应力/强度的比值)下降是导致塌陷的直接原因^[21]。股骨头坏死后并不立即发生明显的骨结构和力学性能改变,修复过程启动后才出现骨结构损害和力学性能降低,最终发生塌陷。这是由于^[22]:①骨坏死修复时,骨母细胞增生的同时破骨细胞活性也增加,导致骨吸收。②不完全钙化和塑形的新生骨力学性能降低。③坏死骨与活骨之间产生应力集中。Brown 等^[23]从中晚期 ONFH 患者股骨头切取的坏死松质骨进行非轴向加压试验,发现其屈服强度减少 52%,弹性模量减少 72%。Kim 等^[24]对坏死股骨头的软骨下骨和中部松质骨分别进行了力学测定,证明负重区软骨下骨力学性能的降低与股骨头塌陷有直接关系,随着软骨下骨板力学性能的下降,软骨下骨产生更大的应力,并随软骨下骨板的断裂而塌陷。

由于股骨头的力学强度下降,以及骨组织及结构的改变使股骨头应力集中,受力后骨小梁易发生微骨折。多处微骨折超出骨组织修复能力时,结果将导致股骨头塌陷变形。Brown 等^[25]用有限元方法分析证实坏死骨周围的应力集中是病情进展的主要原因。应力集中可导致股骨头内骨折,不仅影响局部力学性能,而且还可阻断坏死组织的修复,使负重区软骨下骨难以得到骨性修复。史风雷等^[26]通过三维有限元模拟加载试验表明,由于坏死股骨头内各个部分之间的弹性模量不同,在应力作用下股骨头内部的应力传导是不均匀的。肉芽带是股骨头内力学结构最薄弱的部分,也是应力最集中的部分。因此,坏死的股骨头在负重时,肉芽带的应力集中会导致股骨头内部的不稳定,引起股骨头内部的修复障碍,肉芽带的压缩是导致股骨头塌陷的重要原因之一。

4 预测塌陷与力学分析

ONFH 一旦发生塌陷,髋关节生物力学的不稳定性显著增加,将严重地影响股骨头坏死的修复,导致髋关节半脱位以及股骨头软骨的破坏,最终导致骨性关节炎提前发生,严重影响到髋关节功能的恢复。因此,如何正确预测股骨头塌陷,成为 ONFH 治疗的一个关键问题。文献报道股骨头坏死后塌陷的预测主要依据影像学资料,根据坏死部位^[27]、面积^[28-29]、坏死指数^[30]、坏死角度^[31-32]、MRI 信号特点^[33]以及同时将上述方法结合^[34-36]进行预测。

坏死病灶的大小、形状及相对于承重区轴线的位置与是否塌陷有着紧密的联系^[23,37]。Ohzono 等^[27]认为,如果坏死范围

小或软骨下骨完整,则不易塌陷;若坏死范围大,累及负重区,在应力作用下股骨头易塌陷。Yang 等^[38]通过三维有限元模型分析坏死病灶的几何形状与塌陷之间的关系,发现当坏死区顶角大于 110°时,软骨下区及深部的坏死区与正常组织交界处的压力指标超过生理上限;而坏死区顶角不超过 110°时,坏死区压力指标则不超过生理上限;同时观察了 28 例的股骨头坏死样本,发现松质骨骨折主要发生在深部坏死区与正常组织的交界处和软骨下区,这与三维有限元分析的应力指标相符。崔旭等^[39]采用三维有限元理论分析不同部位囊性变所引起的股骨头塌陷的危险程度,发现负重区下方的囊性变最易引起软骨面塌陷,其次为其内侧和外侧的囊性变,而位于股骨头前方和后方的囊性变,周围应力集中不是很明显,引起股骨头软骨面塌陷的风险不大。位于股骨头中心和下方的囊性变,因为其距离关节面较远,应力传到囊性变区时已经减弱,所以囊性变周围应力集中不是很明显,引起股骨头软骨面塌陷的风险不大。

5 保髋手术与力学稳定

股骨头缺血后将发生骨坏死、新骨修复、塌陷、头变形、骨关节炎等一系列病理改变。在 ONFH 的不同病理阶段,坏死股骨头的骨结构、形态、头臼关系等发生异常变化,都将导致髋关节生物力学发生变化,影响股骨头坏死的预后和转归。近年来,随着对股骨头坏死塌陷本质的认识,生物力学因素在保髋治疗中越来越受到重视。何伟等^[1]在 20 多年 3 000 多例股骨头坏死临床诊疗实践的基础上,首先提出非创伤性股骨头坏死“围塌陷期”新概念,并认为预防纠正塌陷是保髋治疗的关键。塌陷前,积极预防塌陷,为股骨头坏死修复创造稳定的力学环境;塌陷后早期,促进修复必须与重建稳定、纠正塌陷相结合;塌陷后晚期,生物学与力学稳定均要重建,优先恢复稳定兼顾纠正塌陷。目前,预防和纠正股骨头塌陷的治疗方法主要有髓芯减压术、骨移植术和截骨术等。

髓芯减压术是治疗早期 ONFH 的最常用的手术方法,其目的是减低股骨头的压力进而降低股骨头部的髓内压,重新恢复血管内的血流,从而减轻髋部的疼痛^[40]。Brown 等^[25]通过三维有限元分析发现,髓芯减压最合理的位置是坏死区的中心,髓芯减压去除了结构性骨质,股骨头的力学结构遭到破坏,最大应力/强度比值显著增高。如果单行髓芯减压而不行骨移植,髓芯减压的隧道不应在坏死区外侧,应位于坏死区中央,这样能更有效地降低骨内压。另外,通过髓芯减压通道采用骨移植可以改变载荷的分布。

骨移植治疗 ONFH 的原理是给病变的股骨头提供结构支撑,预防纠正塌陷,为坏死的修复创造稳定的力学环境。骨移植又可分为游离植骨和带血运的骨移植。20 世纪 40 年代 Phemister 开始采用植骨预防塌陷,促进坏死修复。用二维有限元分析髓芯活检及髓芯减压后,股骨头内移植皮质骨的应力变化情况,发现髓芯活检后于股骨头外上部行皮质骨移植,可使股骨头内应力减少 50%,骨移植未达到软骨下骨板,则会产生应力集中,于股骨头内侧植骨,不会减少来自股骨头外上部的应力。赵德伟等^[41]采用带血运的髂骨瓣植入治疗 ONFH,髂骨瓣的皮质骨与股骨头软骨下骨板弹性模量相似,具有支撑作用,可以将关节面的应力下传,避免骨瓣周围的应力集中,成活后能有效地防止股骨头塌陷。梅荣成等^[42]设计了同种异体骨支撑架,植入体内后可对坏死股骨头负重区软骨

下骨起到有力的持续机械支撑作用, 应力通过软骨下骨传导后, 能均匀的分布到支撑架的表面并向四周分散, 避免了应力集中, 为髓芯减压区新骨的形成创造了一个相对安静的环境。史风雷等^[43]采用内支撑术治疗围塌陷期 ONFH, 并用有限元的方法进行生物力学分析, 结果表明内支架植入后股骨头内的应力峰值较植入前减少约 30%, 内支撑术能够减少股骨头的应力负荷, 稳定股骨头的内环境, 有利于坏死修复, 可有效预防股骨头坏死塌陷。何伟等^[44]通过髓芯减压、打压植骨、游离腓骨植入、螺钉固定支撑术治疗“围塌陷期”股骨头坏死, 先采用松质骨进行层层打压植骨, 改善塌陷, 理论上避免了可能产生的应力集中; 在打压植骨下方植入皮质骨条则加强了对上方植骨的支持; 皮质骨条旁拧入的螺钉可稳定骨条及骨条周围坏死区可能存在的断裂; 在重建生物学骨传导途径的同时, 重建了股骨头的力学稳定, 为其修复提供良好环境。

截骨术治疗 ONFH 的理论基础是基于生物力学效果, 即将股骨头的坏死或塌陷病灶从髋关节主要受力区域移出, 让正常股骨头关节软骨并有健康骨支撑的区域取而代之, 从而减少坏死区的压力以阻止股骨头的塌陷或进一步塌陷。通过三维有限元分析发现, 截骨角度为 30°的内翻、外翻截骨对于几何形状相对窄而深的坏死病灶有一定的疗效 (此时内翻截骨相对外翻截骨更有效), 而对于那些宽而浅的坏死病灶截骨术的疗效则不佳。Schmitt 等^[45]发现截骨角度对股骨头软骨面的应力变化影响很大, 如果坏死区很大, 旋转截骨对应力改善不大。Chen 等^[46]通过三维有限元分析研究旋转截骨时发现, 如果考虑患者处于静立状态, 内旋截骨比外旋截骨能更有效地把坏死病灶移出负重区, 而考虑步态行走, 则外旋截骨疗效更佳。

股骨头缺血性坏死仍是骨科学中一个尚未解决的难题, 随着生物力学实验的发展及有限元模型研究的进一步深入, 生物力学因素在股骨头坏死发生、发展及转归过程中的重要作用将会得到进一步阐释, 从而更好地解释股骨头坏死的临床症状、相关影像学表现、揭示塌陷的本质、预测塌陷的发生、指导保髋手术方案的选择以及治疗效果的评价, 以提高股骨头坏死的整体疗效。

参考文献

[1] 何伟, 袁浩, 张庆文, 等. 非创伤性股骨头坏死塌陷与围塌陷期的诊疗策略[C]. 全国髋关节外科学术研讨会, 2006: 10-11.
He W, Yuan H, Zhang QW, et al. Diagnosis and treatment strategy of non-traumatic femoral head necrosis collapse and peri-collapse period[C]. China Hip Joint Surgery Academic Seminar, 2006: 10-11. Chinese.

[2] Petrigliano FA, Lieberman JR. Osteonecrosis of the hip: novel approaches to evaluation and treatment [J]. Clin Orthop Relat Res, 2007, 465(1): 53-62.

[3] Jones LC, Hungerford DS. The pathogenesis of osteonecrosis[J]. Instr Course Lect, 2007, 56(2): 179-196.

[4] Mont MA, Jones LC, Hungerford DS. Nontraumatic osteonecrosis of the femoral head; ten years later [J]. J Bone Joint Surg Am, 2006, 88(5): 1117-1132.

[5] 俞素静, 吴承亮. 非创伤性股骨头坏死的病理组织学探讨[J]. 中医正骨, 2007, 19(8): 83-85.
Yu SJ, Wu CL. Investigation of histopathology of non-traumatic femoral head necrosis[J]. Zhong Yi Zheng Gu, 2007, 19(8): 83-85.

Chinese.

[6] James RU, John PJ Jr. 董天华, 郑召民译. 骨坏死-病因、诊断与治疗[M]. 郑州: 河南医科大学出版社, 1999: 8.
James RU, John PJ Jr. Dong TH, Zheng ZM. Osteonecrosis-cause of disease, diagnosis and therapy[M]. Zhengzhou: Henan University of Medicine Publishing House, 1999: 8. Chinese.

[7] Ficat RP, Arlet J. Necrosis of the femoral head[M]. //Hungerford DS. Ischemia and necrosis of bone. Baltimore: Williams & Wilkins, 1980: 11-52.

[8] Daffner RH, Pavlov H. Stress fractures; current concepts[J]. AJR Am J Roentgenol, 1992, 159: 245-252.

[9] Schweitzer ME, White LM. Does altered biomechanics cause marrow edema[J]? Radiology, 1996, 198(3): 851-853.

[10] Huang GS, Chan WP, Chang YC, et al. MR imaging of bone marrow edema and joint effusion in patients with osteonecrosis of the femoral head: relationship to pain[J]. AJR Am J Roentgenol, 2003, 181(2): 545-549.

[11] Kubo T, Yamazoe S, Sugano N, et al. Initial MRI findings of non-traumatic osteonecrosis of the femoral head in renal allograft recipients[J]. Magn Reson Imaging, 1997, 15: 1017-1023.

[12] Koo KH, Ahn IO, Kim R, et al. Bone marrow edema and associated pain in early stage osteonecrosis of the femoral head: prospective study with serial MR images[J]. Radiology, 1999, 213: 715-722.

[13] Sakai T, Sugano N, Nishii T, et al. MR findings of necrotic lesions and the extrasiesional area of osteonecrosis of the femoral head[J]. Skeletal Radiol, 2000, 29: 133-141.

[14] Shimizu K, Moriya H, Akita T, et al. Prediction of collapse with magnetic resonance imaging of avascular necrosis of the femoral head[J]. J Bone Joint Surg Am, 1994, 76-A: 215-223.

[15] Kim YM, Oh HC, Kim HJ. The pattern of bone marrow oedema on MRI in osteonecrosis of the femoral head[J]. J Bone Joint Surg Br, 2000, 82(6): 837-841.

[16] Iida S, Harada Y, Shimizu K, et al. Correlation between bone marrow edema and collapse of the femoral head in steroid-induced osteonecrosis[J]. AJR Am J Roentgenol, 2000, 174(3): 735-743.

[17] Fujioka M, Kubo T, Nakamura F, et al. Initial changes of non-traumatic osteonecrosis of femoral head in fat suppression images: bone marrow edema was not found before the appearance of band patterns[J]. Magn Reson Imaging, 2001, 19(7): 985-991.

[18] Ito H, Matsuno T, Minami A. Relationship between bone marrow edema and development of symptoms in patients with osteonecrosis of the femoral head[J]. AJR Am J Roentgenol, 2006, 186(6): 1761-1770.

[19] 何伟, 李勇, 张庆文, 等. 股骨头坏死修复反应区的骨髓水肿及其病理改变[J/OL]. 中华关节外科杂志: 电子版, 2008, 2(1): 57-62.
He W, Li Y, Zhang QW, et al. The bone marrow edema and pathologic changes in reacting region around osteonecrosis of femoral head[J/OL]. Zhonghua Guan Jie Wai Ke Za Zhi, 2008, 2(1): 57-62. Chinese.

[20] Lieberman JR, Berry DJ, Montv MA, et al. Osteonecrosis of the hip: management in the twenty-first century[J]. J Bone Joint Surg Am, 2002, 84: 834-853.

[21] 王庆蕾, 侯树勋. 成人股骨头缺血性坏死的生物力学研究进展[J]. 中华综合临床医学杂志(山东), 2005, 7(3): 32-34.
Wang QL, Hou SX. Investigation progress of biomechanic of

- avascular necrosis of the femoral head in adult [J]. *Zhonghua Zong He Lin Chuang Yi Xue Za Zhi*(Shandong), 2005, 7(3):32-34. Chinese.
- [22] 王金熙,董天华,陈贤志,等. 实验性股骨头缺血性坏死修复过程的生物力学研究[J]. *中华外科杂志*, 1993, 31(6):374-377. Wang JX, Dong TH, Chen XZ, et al. Biomechanic study of repairing of experimental avascular necrosis of the femoral head[J]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 1993, 31(6):374-377. Chinese.
- [23] Brown TD, Hild GL. Pre-collapse stress redistributions in femoral head osteonecrosis—a three-dimensional finite element analysis[J]. *J Biomech Eng*, 1983, 105(2):171-176.
- [24] Kim YM, Lee SH, Lee FY, et al. Morphologic and biomechanical study of avascular necrosis of the femoral head[J]. *Orthopedics*, 1991, 14:1111-1116.
- [25] Brown TD, Pedersen DR, Baker KJ, et al. Mechanical consequences of core drilling and bone-grafting on osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1993, 75:1358-1367.
- [26] 史风雷,张美超. 建立股骨头坏死有限元模型的方法[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 12(30):5890-5891. Shi FL, Zhang MC. Constructing a finite element model of osteonecrosis of the femoral head[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu*, 2008, 12(30):5890-5891. Chinese.
- [27] Ohzono K, Saito M, Sugano N, et al. The fate of nontraumatic avascular necrosis of the femoral head. A radiologic classification to formulate prognosis[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1992, (277):73-78.
- [28] Sugano N, Takaoka K, Ohzono K, et al. Prognostication of nontraumatic avascular necrosis of the femoral head[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1994, (303):155-164.
- [29] 赵凤朝,李子荣,张念非,等. 股骨头坏死的塌陷预测[J]. *实用骨科杂志*, 2005, 11(2):108-112. Zhao FC, Li ZR, Zhang NF, et al. Prediction of collapse with magnetic resonance imaging of avascular necrosis of the femoral head[J]. *Shi Yong Gu Ke Za Zhi*, 2005, 11(2):108-112. Chinese.
- [30] Koo KH, Kim R, Ko GH, et al. Preventing collapse in early osteonecrosis of the femoral head. A randomised clinical trial of core decompression[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1995, 77-B:870-874.
- [31] Kerboul M, Thomine J, Postel M, et al. The conservative surgical treatment of idiopathic aseptic necrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joins Surg Br*, 1974, 56-B:291-296.
- [32] Ha YC, Jung WH, Kim JR, et al. Prediction of collapse in femoral head osteonecrosis: a modified Kerboul method with use of magnetic resonance images[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 3:35-40.
- [33] Kokubo T, Takateri Y, Ninomiya S, et al. Magnetic resonance imaging and scintigraphy of avascular necrosis of the femoral head. Prediction of subsequent segmental collapse[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1992, 277:54-60.
- [34] Laffirgue P, Dahan E, Chagnaud C, et al. Early-stage avascular necrosis of the femoral head: MR imaging for prognosis in 31 cases with at least 2 years of follow-up[J]. *Radiology*, 1993, 187:199-204.
- [35] Nishii T, Sugano N, Ohzono K, et al. Significance of lesion size and location in the prediction of collapse of osteonecrosis of the femoral head: a new three-dimensional quantification using magnetic resonance imaging[J]. *J Orthop Res*, 2002, 20(1):130-136.
- [36] Shimizu K, Moriya H, Akita T, et al. Prediction of collapse with magnetic resonance imaging of avascular necrosis of the femoral head[J]. *J Bone Jint Surg Am*, 1994, 76-A:215-223.
- [37] Brown TD, Way ME, Ferguson AB Jr. Stress transmission anomalies in femoral heads altered by aseptic necrosis[J]. *J Biomech*, 1980; 13(8):687-699.
- [38] Yang JW, Koo KH, Lee MC, et al. Mechanics of femoral head osteonecrosis using three-dimensional finite element method[J]. *Arth Orthop Trauma Surg*, 2002, 122(2):88-92.
- [39] 崔旭,赵德伟,古长江. 股骨头缺血性坏死塌陷预测的生物力学研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(2):193-198. Cui X, Zhao DW, Gu CJ. Biomechanical study on predicting the collapse of ischemic necrosis of the femoral head[J]. *Zhongguo Lin Chuang Jie Pou Xue Za Zhi*, 2005, 23(2):193-198. Chinese.
- [40] Lieberman JR, Berry DJ, Mont MA, et al. Osteonecrosis of the hip: management in the 21st century[J]. *Instr Course Lect*, 2003, 52:337-355.
- [41] 赵德伟,徐达传,崔旭. 股骨头不同区域囊变对力学承载的影响[J]. *中华骨科杂志*, 2005, 25(4):232-235. Zhao DW, Xu DC, Cui X. The biomechanical influences of cystic degeneration in different locations within femoral head[J]. *Zhonghua Gu Ke Za Zhi*, 2005, 25(4):232-235. Chinese.
- [42] 梅荣成,杨述华,杨操,等. 同种异体骨支撑架结合自体骨和脱钙骨基质植入强化力学结构修复股骨头坏死[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 12(19):3620-3624. Mei RC, Yang SH, Yang C, et al. Biostructural augmentation for the osteonecrotic femoral head by implanting a composite of allogeneic bone support frame, autologous bone and decalcified bone matrix [J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu*, 2008, 12(19):3620-3624. Chinese.
- [43] 史风雷,吕夫新,李晓辉,等. 内支撑术治疗成人股骨头坏死的临床观察和有限元分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2008, 23(3):186-188. Shi FL, Lü FX, Li XH, et al. Clinical observation on internal bracket implanting for treatment of adult necrosis of femoral head and finite element analysis[J]. *Zhongguo Gu Yu Guan Jie Sun Shang Za Zhi*, 2008, 23(3):186-188. Chinese.
- [44] 何伟,李勇,张庆文,等. 自体骨或同种异体腓骨联合打压植骨治疗股骨头坏死的初步研究[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2009, 23(5):530-533. He W, Li Y, Zhang QW, et al. Primary outcome of impacting bone graft and fibular autograft or allograft in treating osteonecrosis of femoral head[J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2009, 23(5):530-533. Chinese.
- [45] Schmitt J, Meiforth J, Lengsfeld M. Development of a hybrid finite element model for individual simulation of intertrochanteric osteotomies[J]. *Med Eng Phys*, 2001, 23(8):529-539.
- [46] Chen WP, Tai CL, Tan CF, et al. The degrees to which transtrochanteric rotational osteotomy moves the region of osteonecrotic femoral head out of the weight-bearing area as evaluated by computer simulation[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2005, 20(1):63-69. (收稿日期:2010-04-14 本文编辑:连智华)