

文章编号: 1004-7220(2021)03-0365-06

利用壁厚分析法定量判断胫骨骨折骨愈合程度

李颖^{1,2}, 童梁成¹, 薛庆¹, 杨智伟¹, 夏超¹, 杨俊生¹, 汪剑龄¹, 邢建新³

(1. 解放军东部战区空军医院 骨科, 南京 210002; 2. 安徽医科大学 临床医学院, 合肥 230032; 3. 南京市雨花医院 骨科, 南京 210039)

摘要:目的 利用壁厚分析法定量判断胫骨骨折愈合程度,为临床判断胫骨骨不连和骨延迟愈合提供直观的诊断依据。**方法** 对48例患者下肢患侧与健侧进行三维建模后,计算最大壁厚(maximum wall thickness, MWT),并进行比值计算,将其对比值(B 值)作为骨愈合程度的量化指标全程动态观察。当 $B_{MWT2}>0.9$ 且 $B_{MWT1}>0.9$ 时判定骨愈合;当 $B_{MWT2}=0.9\sim 0.7$ 时判定骨愈合不良,定期复查该数值无明显增长,连续两次,可以判定骨不连,需要第二次手术干预治疗;当 $B_{MWT3}>0.9$,且 $B_{MWT1}<0.7$ 和 $B_{MWT2}<0.7$ 时,可判定为内固定失效,二次手术中需更换内固定。对于临床诊断进行二次修正,并观察最终临床愈合结果。**结果** 对48例患者各复查时间段影像学进行临床诊断分析及有限元壁厚分析比较,临床判断骨延迟愈合21例,骨不连27例,再利用壁厚分析修正判断,骨延迟愈合34例,骨不连14例。其中2例判断内置物失效,采用更换内固定植骨干预,12例判断内固定仍然有效,单纯植骨手术干预,所有病例最终都取得骨愈合。进行Bowker检验法得到 $P=0.094$,判断壁厚分析方法与临床诊断相符合。**结论** 采用壁厚分析法可以定量分析骨折端的骨愈合程度,实现骨愈合程度的快速计算。病例结果证实有限元壁厚分析法优于单纯临床诊断法,对早期判断骨愈合不良有更好的鉴别诊断意义。

关键词:骨愈合;骨不连;胫骨骨折;壁厚分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.011

Application of Wall Thickness Analysis in Estimating the Degree of Tibial Fracture Bone Healing

LI Ying^{1,2}, TONG Liangcheng¹, XUE Qing¹, YANG Zhiwei¹, XIA Chao¹,
YANG Junsheng¹, WANG Jianling¹, XING Jianxin³

(1. Department of Orthopaedics, Air Force Hospital of Eastern Theater Command of PLA, Nanjing 210002, China; 2. Clinical Medical College, Anhui Medical University, Hefei 230032, China; 3. Department of Orthopaedics, Nanjing Yuhua Hospital, Nanjing 210039, China)

Abstract: Objective To quantitatively judge the degree of tibial bone healing using the finite element wall thickness analysis method, so as to provide an intuitive diagnostic basis for clinical judgment of tibial union and delayed bone healing. **Methods** After three-dimensional (3D) modeling for the affected and healthy limb side of 48 patients, the maximum wall thickness (MWT) was calculated, and the ratio (B value) was used as a quantitative index of bone healing. When both B_{MWT2} and B_{MWT1} were greater than 0.9, bone healing could be judged. When B_{MWT2} was between 0.9 and 0.7, bone union was judged to be poor, and there was no significant increase in this value after regular reexamination. When B_{MWT3} was above 0.9 while both B_{MWT1} and B_{MWT2} were smaller than 0.7, it could be judged as internal fixation failure, which should be replaced during the second

收稿日期:2020-06-11; 修回日期:2020-07-05

基金项目:南京军区医学科技创新项目(15DX012),南京市科技计划项目(201503008)

通信作者:李颖,副主任医师,E-mail:dbkj454@163.com

operation. The clinical diagnosis was revised twice, and the final clinical healing results were observed. **Results** Clinical diagnosis analysis and finite element wall thickness analysis were carried out in 48 patients during each review period, and 21 cases of delayed bone healing and 27 cases of bone nonunion were judged clinically. Among them, 2 cases were judged to be ineffective, and bone grafting intervention was adopted to replace the internal fixation, 12 cases were judged to be still effective, and all cases were finally healed by surgical intervention of bone grafting alone. By Bowker test, $P=0.094$ was obtained, indicating that the wall thickness analysis method was consistent with the clinical diagnosis. **Conclusions** The wall thickness analysis method can be used to quantitatively analyze the degree of bone healing at fracture end and realize the rapid calculation of bone healing degree. The case results in this study show that the finite element wall thickness analysis method is superior to the simple clinical diagnosis method, and has better differential diagnostic significance for early diagnosis of poor bone healing.

Key words: bone healing; bone nonunion; tibial fracture; wall thickness analysis

胫骨骨折是临床常见的骨折类型。由于解剖结构的原因,胫骨骨折后骨髓炎、骨愈合不良、骨延迟愈合和骨不连的发生率较高。目前关于骨愈合的诊断主要依据局部、影像学及功能标准,认为骨折部无压痛及纵向叩击痛、局部无异常活动、X线片显示骨折处有连续性骨痂或骨折线已模糊,即为骨愈合标准^[1-2]。一般而言,超过6个月骨未愈合可诊断为延迟愈合,超过9个月骨未愈合可诊断为骨不连,三者之间的鉴别诊断主要依靠X线片及医生的临床经验判断。在实际工作中,胫骨骨折病例骨愈合不良程度的判断及愈合前景的预估是困扰临床工作的难题。

Cortet等^[3]采用定量CT测量法测量骨密度,利用骨结构分析提供的更多骨量数据来解释骨强度。结果表明,骨皮质厚度和密度是决定骨结构强度的关键因素,可以用于提高骨折风险的预测。Yu等^[4]通过常规影像学检查获得股骨颈和股骨粗隆骨折间骨分布的空间差异,从而预测髌部骨折风险。叶春晓等^[5]通过X线检查测量桡骨远端骨皮质厚度发现,骨皮质变薄与骨质疏松相关。本文利用壁厚分析法三维定量判断胫骨骨折愈合程度,为临床判断胫骨“骨不连”和“骨延迟愈合”提供直观的诊断依据^[6-8]。

1 材料与方法

1.1 一般资料

取2013年4月~2018年10月,解放军东部战区空军医院骨科,临床诊断“骨不连”和“骨延迟愈合”患者48例。所有患者随访2~4年,在骨愈合的

不同阶段多次进行CT检查,利用最大壁厚分值进行比值计算,其对比值作为骨愈合程度的量化指标全程动态观察,对于临床诊断进行二次修正,并观察最终临床愈合结果。其中,男35例,女13例,平均年龄44.9岁。胫骨近端骨7例(41-A3 3例,41-C2 4例),胫骨中段19例(42-C1 7例,42-C3 12例),胫骨远端22例(43-A3 10例,43-C1 6例,43-C3 6例)。内固定方式:髓内固定14例,髓外固定34例。观察时间最短1.5年,最长4年。采用皮质骨壁厚三维有限元技术对48例患者进行分析,共计326次,拟定治疗方案。

1.2 数据采集

硬件:Light Speed 64排螺旋CT机(GE公司,美国)。Dell电脑(CPU:E3-1225 V2, 3.20 GHz,内存:16 GB;显卡:NVIDIA Quadro K4200;操作系统:Windows 10, 64位)。软件:Mimics 20.0, 3-matic 12.0(Materialise公司,比利时),由三的部落(上海)科技股份有限公司提供。

1.2.1 数据采集与处理 将患者双侧下肢平行摆放,脚尖向上,进行全长扫描,CT扫描间距为0.625 mm,共获得512×512像素CT断层图片。扫描电压140 kV,曝光量100 mA·s,螺距0.625 mm(此方法可以减少金属伪影)。

1.2.2 三维重建 利用Mimics软件直接读取DICOM 3.0格式CT断层图片。经过对图像定位、组织以及三维计算,生成包括患侧含内固定、不含内固定和健侧三维几何模型,三角面片优化网格划分。

1.2.3 有限元壁厚分析 将健侧、患侧含内固定、不含内固定模型的3组数据导入3-matic分别进行

壁厚分析,通过判读骨皮质壁厚薄弱区的情况以及材料密度与刚度的转化关系,对健侧肢体、患肢含内固定、不含内固定模型的最大壁厚(maximum wall thickness, MWT)进行比值分析。

将相同条件下健康侧骨段 CT 扫描数据进行三维重建,得到的力学分析图称为基础位相图;将患

肢骨段 CT 扫描数据进行三维重建,得到的力学分析图称为目标位相图;将患侧目标骨段 CT 扫描数据,在计算机模拟下取出内固定并进行三维重建,得到的力学分析图称为模拟位相图。红色区为壁厚较大区,绿色区为壁厚较薄弱区,红色顶部数值为 MWT(见图 1)。



图 1 壁厚分析

Fig.1 Wall thickness analysis (a) Basic phase diagram, (b) Target phase diagram, (c) Analog phase diagram

B 值计算方法:将目标位相图与基础位相图 MWT 进行比值运算,得到目标 MWT (B_{MWT1}),即 $B_{MWT1} = \text{目标 MWT} / \text{基础 MWT}$ 。将模拟位相图与基础位相图 MWT 进行比值运算,得到模拟 MWT (B_{MWT2}),即 $B_{MWT2} = \text{模拟 MWT} / \text{基础 MWT}$ 。将模拟位相图与目标位相图 MWT 进行比值运算,得到患肢骨段 MWT (B_{MWT3}),即 $B_{MWT3} = \text{模拟 MWT} / \text{目标 MWT}$ 。

1.3 骨折愈合标准

目前关于骨折临床愈合主要指患者已可拆除外固定,通过功能锻炼逐渐恢复患肢功能。其标准为:① 骨折部无压痛及纵向叩击痛;② 局部无异常活动;③ X 线片显示骨折处有连续性骨痂,骨折线已模糊;④ 拆除外固定后,上肢能向前平举 1 kg 重物持续达 1 min;下肢不扶拐能在平地连续步行 3 min,并不少于 30 步。连续观察 2 周骨折处不变形。超过 3 个月为延迟愈合,超过 6 个月骨折不愈合即为骨不连^[1]。

骨愈合有限元壁厚分析法判断标准:有限元壁厚分析法应用到长管骨骨愈合过程中,当 $B_{MWT1} > 0.9$ 且 $B_{MWT2} > 0.9$ 时,判定骨愈合,可以取内固定;当 $B_{MWT1} > 0.9$ 而 $B_{MWT2} = 0.9 \sim 0.7$ 时,判定骨愈合不良,继续观察;当 $B_{MWT1} < 0.8$,初步判定骨愈合不

良,连续两次,定期复查该数值无明显增长,可以判定骨延迟愈合,需要第二次手术干预治疗;术后 2 年以上,且 $B_{MWT1} < 0.6$,可直接判定骨不连,建议植骨手术干预治疗;在判断骨不连的病例中,当 $B_{MWT3} > 0.9$,且 $B_{MWT1} < 0.7$ 和 $B_{MWT2} < 0.7$ 时,可判定为内固定失效,二次手术中需更换内固定。

1.4 统计学处理

以均值±标准差表示连续型变量,以百分率表示计数资料,对于计数资料采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验分析数据差异。采用 Bowker 检验法,判断壁厚分析方法与临床诊断是否灵敏,设定 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。所有统计学分析均通过 SPSS 25.0 进行。

2 结果

2.1 病例结果分析

单纯使用临床标准判断 48 例病例,所有病例共进行 174 次有限元壁厚分析,平均每人 3.625 次,最多分析 5 次,最少分析 1 次。其中,骨愈合临床判断 8 例(16.67%),有限元壁厚分析判断骨愈合 13 例(27%),骨延迟愈合临床判断 36 例(75%),有限元壁厚分析判断 27 例(56.25%),骨不连临床判断 4 例(8.33%),有限元壁厚分析判断 8 例

(16.67%)。判定骨不连8例中,需要植骨手术6例(75%),内固定失效2例(25%)。对患者进行早期干预后,患者预后均得到满意治疗效果。所有患者骨折处愈合良好,内固定取出,观察半年无并发症。因此,相比单纯临床诊断,壁厚分析诊断可以准确判断骨愈合情况。运用 SPSS 25 进行 Bowker 检验法,得到 $P=0.094(P>0.05)$,判断壁厚分析方法与临床诊断相符合,并且对骨愈合给予量化。结果表明,经 Fisher 精确概率检验法分析,采用壁厚分析结果与患者性别不存在显著相关性,但受伤部位及内固定方式存在相关性(见表1)。

2.2 典型病例报告

2.2.1 骨不连分析 本例患者男性,64岁,撞伤致右小腿肿痛畸形伴活动受限2h,入院。诊断为右胫腓骨上段粉碎性骨折(AO:41-C2)。术后3年复查CT提示,内固定在位,原骨折处愈合不良,骨硬化明显。通过有限元壁厚分析结果可知,患者术后3年, $B_{MWT1}>0.9$ 而 $B_{MWT2}=0.9\sim 0.7$,可直接判定骨不连,建议植骨手术干预治疗;并且影像学检查

表1 48例胫骨骨折延迟愈合随访有限元壁厚分析法结果

Tab.1 Results of finite element wall thickness analysis in the follow-up of 48 cases with delayed union of tibial fracture

分类	骨愈合	骨延迟愈合	骨不连	Fisher 精确概率检验法
性别				0.322
男	8	22	5	
女	5	5	3	
受伤部位				0.054
胫骨近端(AO分型31)	3	3	1	
41-A3	1	2	0	
41-C2	2	1	1	
胫骨中段(AO分型32)	13	4	2	
42-C1	5	2	0	
42-C3	8	2	2	
胫骨远端(AO分型33)	5	12	5	
43-A3	2	5	3	
43-C1	2	3	1	
43-C3	1	4	1	
内固定方式				0.010
髓内固定	8	4	2	
髓外固定	5	23	6	

见骨缺损及骨不连,内固定稳定,可以建议重新植骨手术,不更换内固定(见图2)。

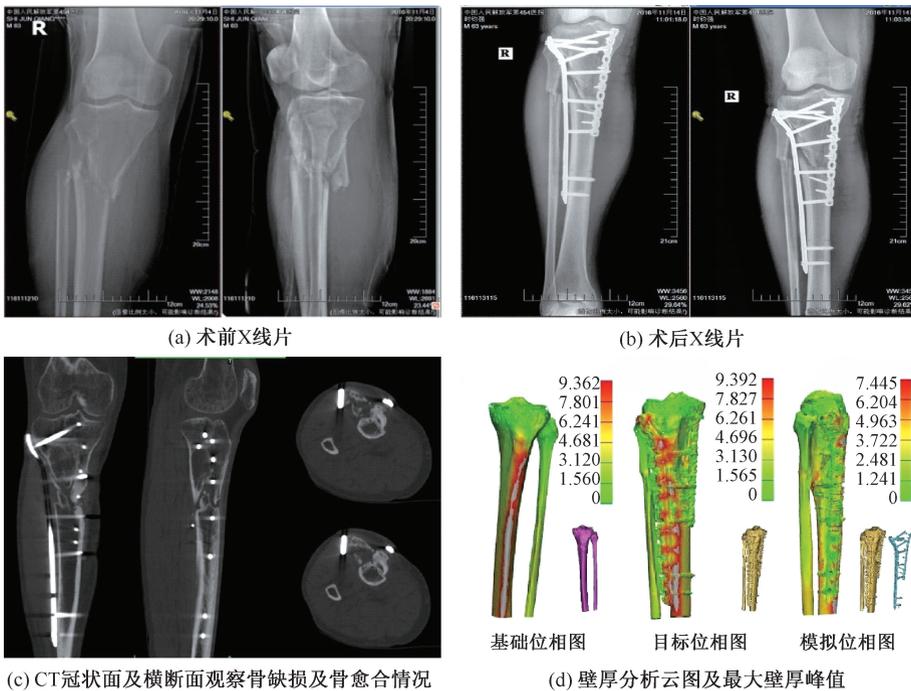


图2 病例1术后3年CT复查影像及有限元分析结果

Fig.2 Results of CT reexamination and finite element analysis 3 years after operation for Case 1 (a) Preoperative X-ray film, (b) Postoperative X-ray film, (c) Observation of bone defect and bone healing on coronal and transverse sections of CT, (d) Cloud picture of wall thickness analysis and peak of maximum wall thickness

2.2.2 内固定失效分析 本例患者女性,45岁,车祸伤致全身多部位疼痛伴活动受限2周,入院。诊断为左胫骨平台陈旧性骨折(AO:41-C3),进行左胫骨平台切开复位内固定加取髂骨植骨术,术后5个月复查CT提示内固定在位,周围见骨溶解区,左膝

关节平台塌陷,膝关节稳定性丢失。通过壁厚分析结果可以看出, $B_{MWT}3 > 0.9$,且 $B_{MWT}1 < 0.7$ 和 $B_{MWT}2 < 0.7$,可判定为内固定失效,并且影像学检查见骨缺损及骨不连,内固定不稳定,二次手术中需更换内固定(见图3)。

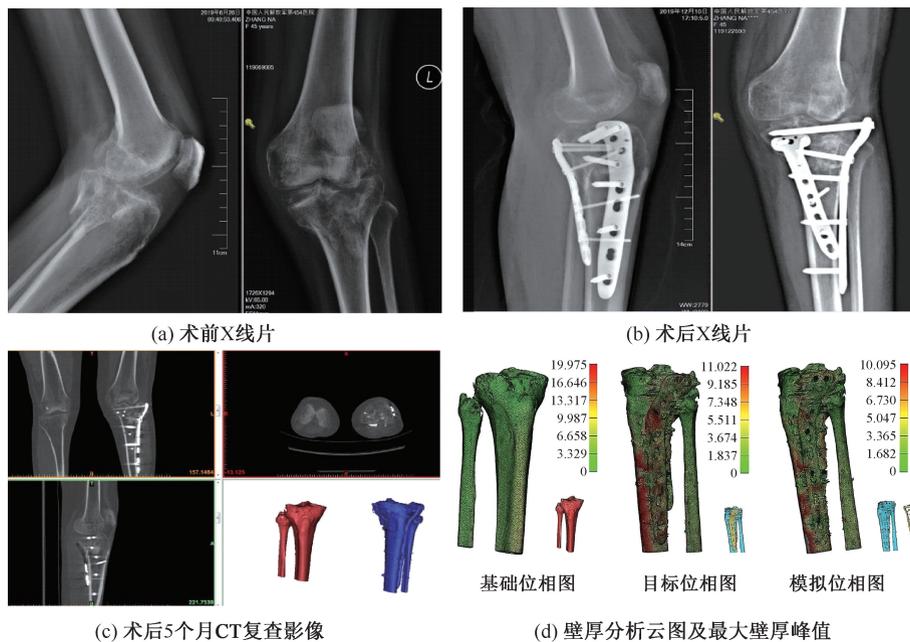


图3 病例2术后5个月CT复查影像及有限元分析结果

Fig.3 Results of CT reexamination and finite element analysis 5 months after operation for Case 2 (a) Preoperative X-ray film, (b) Postoperative X-ray film, (c) CT reexamination images 5 months after operation, (d) Cloud picture of wall thickness analysis and peak of maximum wall thickness

3 讨论

目前,越来越多的学者开展骨折愈合生物力学研究。应用成人下肢连续薄层CT扫描数据,获取健康成人髌、膝、踝关节连续薄层CT扫描数据,三维重建各关节后构建胫骨头、膝关节、胫骨平台、踝关节中心,三维重建下肢的机械轴线。实验骨折处骨痂矿化定量,计算CT测量值与骨强度之间的相关联系。宋文超等^[9]研究表明,在骨折端施加轴向应力时能促进骨折端骨痂生长,CT数据在骨愈合三维仿真计算中具有重要作用。王武华等^[10]通过分析帕金森患者骨密度与胫骨近端几何结构变化,预测髌部骨折风险。结果表明,胫骨近端几何结构结合骨密度与胫骨颈、转子间截面面积、骨皮质厚度呈高度正相关,与屈曲应力比呈高度负相关,与胫骨颈干角、截面力矩无相关性。方润心等^[11]利用皮

质骨厚度、皮质体积骨密度和体积骨密度的空间分布差异,判断胫骨粗隆骨折风险。采用有限元壁厚分析法,可以实现骨愈合程度的快速计算。林燕语等^[12]利用CT值转化成体素化的骨密度和骨皮质厚度,为髌部骨折风险评估提供有效手段,具有较好的可重复性。刘珍黎等^[13]采用振动声激发超声导波三维有限元仿真方法,通过评估骨皮质厚度来判断骨健康情况。

壁厚法的计算原理是利用壁厚变化来推算结构的密度、刚度和载力特性,而内固定物的形状和材料属性以及与骨接触面的限定方式都会影响计算结果。因此,如何能够保证结果的精度和效率,值得探讨。正是因为上述影响因素的存在,每个“目标骨段”计算出的MWT绝对值意义并不大。本文策略性地采用相同阈值条件下比值方法对结果进行二次分析,在相同的扫描和阈值条件下,上述

影响因素对于结果影响的偏移度一致。通过比值可以有效地消减误差的影响,故比值大小能够得出临床所需要的结论。

测定骨愈合过程中骨痂壁厚的变化,可以判断骨折愈合情况,有助于进行无创性评价骨折愈合以及对骨折内固定术后,指导在合理的时间内进行外加无创性干预治疗以及确定治疗强度^[14-17]。壁厚法没有给予单元格材料赋值计算,提高了分析效率,但同时也在一定程度上牺牲了材料的一些力学属性。通过同等条件下的比值计算能够消除一些影响因素,减少有限元载力分析中金属内固定物伪影、材料属性以及与骨接触面限定方式等产生的计算误差。本文的局限性如下:如何利用壁厚分析法的 B 值,判断骨愈合、骨延迟愈合及骨不连标准区间的设定,需要后期利用大量临床连续观察的随访资料,对骨折处壁厚连续变化的数据进行分析,以增加判断标准区间的准确度。

参考文献:

- [1] 胥少汀, 葛宝丰, 徐印坎. 实用骨科学[M]. 4版. 北京:人民军医出版, 2012.
- [2] BELYTSCHEKO TB, ANDRIACCHI TP, GALANTE JO. Analog studies of forces in the human spine: Computational techniques [J]. J Biomech, 1973, 6(4): 361-371.
- [3] CORTET B, DUBOIS P, BOUTRY N, *et al.* Does high-resolution computed tomography image analysis of the distal radius provide information independent of bone mass? [J]. J Clin Densitom, 2000, 3(4): 339-351.
- [4] YU A, CARBALLIDO-GAMIO J, WANG L, *et al.* Spatial differences in the distribution of bone between femoral neck and trochanteric fractures [J]. J Bone Miner Res, 2017, 32(8): 1672-1680.
- [5] 叶春晓, 郭颖彬, 吴振斌, 等. 桡骨远端骨皮质厚度与骨密度的相关性[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2019, 12(3): 240-247.
- [6] 李颖, 童梁成, 薛庆, 等. 有限元壁厚分析法诊断股骨干骨折术后骨愈合程度的应用价值[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2020, 35(6): 569-572.
- [7] 梁伟, 吴斗, 赵恩哲, 等. 皮质厚度在骨质疏松性髌骨骨折中的应用研究[J]. 中华老年骨科与康复电子杂志, 2018, 4(3): 184-188.
- [8] LUDOVIC H, MARANGALOU JH, BARQUERO LM, *et al.* Technical note: Cortical thickness and density estimation from clinical CT using a prior thickness-density relationship [J]. Med Phys, 2016, 43(4): 1945.
- [9] 宋文超, 张思森, 陈勇, 等. 可控性应力与微动对骨折愈合影响的CT影像结果[J]. 中华创伤骨科杂志, 2015, 17(7): 624-628.
- [10] 王武华, 刘旭东, 胡凌. 股骨近端几何结构结合骨密度预测帕金森病髌骨骨折的风险[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(24): 3829-3833.
- [11] 方润心, 纪爱敏, 盛伟, 等. 接骨板不同螺钉布局下骨愈合过程有限元分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(5): 435-441. FANG RX, JI AM, SHENG W, *et al.* Finite element analysis on bone healing under different screw configurations [J]. J Med Biomech, 2018, 33(5): 435-441.
- [12] 林燕语, 王玲, 张睿, 等. 基于体素的股骨近段骨密度和骨皮质厚度的测量及可重复性研究[J]. 中国骨质疏松杂志, 2018, 24(6): 713-717.
- [13] 刘珍黎, 徐峰, 他得安. 振动声激发超声导波评估皮质骨厚度的研究[J]. 声学技术, 2018, 37(5): 442-445.
- [14] LENAERTS L, WIRTH AJ, LENTHE GH. Quantification of trabecular spatial orientation from low-resolution images [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2015, 18(13): 1392-1399.
- [15] LUO CA, LIN SC, HWA SY, *et al.* Biomechanical effects of plate area and locking screw on medial open tibial osteotomy [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2015, 18(12): 1263-1271.
- [16] 张建新, 王和鸣, 陈日齐, 等. 三维有限元法分析横形斜形骨折对骨折愈合的影响[J]. 医用生物力学, 2005, 20(4): 226-230. ZHANG JX, WANG HX, CHEN RQ, *et al.* Analysis of the affects by transverse or oblique fractures on the bone healing with 3-D limited elementary method [J]. J Med Biomech, 2005, 20(4): 226-230.
- [17] 钟红刚, 刘斌, 张万强, 等. 利用X线平片分析骨折愈合的等效最弱截面[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 142-149. ZHONG HG, LIU B, ZHANG WQ, *et al.* Using radiographs to analyze equivalent weakest transverse interface of fracture healing [J]. J Med Biomech, 2011, 26(2): 142-149.