

文章编号:1004-7220(2014)02-0161-06

不同长度锁钉固定桡骨远端 不稳定骨折的生物力学比较

刘 雄, 吴卫东, 荀福兴, 张美超

(南方医科大学 人体解剖学教研室, 广东省医学生物力学重点实验室, 广州 510515)

摘要: **目的** 比较不同长度锁定螺钉固定桡骨远端骨折的术后稳定性及不同时期骨痂和远端螺钉的应力分布情况,为桡骨远端骨折螺钉长度的选择提供生物力学依据。**方法** 分别建立含骨折断面和骨痂的桡骨远端不稳定骨折的三维有限元模型,并用掌侧锁定钢板和不同长度锁钉固定,通过赋予骨痂不同材料属性来模拟骨折术后不同时期。分析术后不同时期骨痂和远端螺钉的应力分布情况,同时根据骨折断面最大轴向位移计算整个固定系统的压缩刚度。**结果** 对于相同轴向载荷,75%长度以上单皮质螺钉固定时压缩刚度与双皮质螺钉固定相比基本无差异;术后早期骨痂处最大应力随着螺钉长度增加逐渐变小;术后中后期远端螺钉最大应力随着螺钉长度增加逐渐变大,远端双皮质螺钉应力最大。**结论** 采用75%长度以上单皮质锁钉固定桡骨远端不仅可以达到早期稳定性,同时也避免伸肌腱并发症的发生。

关键词: 桡骨远端骨折; 皮质螺钉; 生物力学; 有限元分析; 应力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Biomechanical comparison of unstable distal radius fractures fixed by locking screws with different length

LIU Xiong, WU Wei-dong, XUN Fu-xing, ZHANG Mei-chao (*Department of Anatomy, Southern Medical University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics, Guangzhou 510515, China*)

Abstract: **Objective** To compare the postoperative stability of unstable distal radius fractures fixed by locking screws with different length and analyze the stress distributions of distal screws and callus at different healing periods, so as to provide biomechanical references for choosing appropriate length of screws for treating distal radius fractures. **Methods** The three-dimensional finite element models of unstable distal radius fractures with fracture section and callus were established, respectively, and fixed by volar locking plates and locking screws with different length. Then different periods of fracture healing were simulated by assigning callus with different material properties. Stress distributions on callus and distal screws at different postoperative periods were analyzed, and compression stiffness of the whole fixation system was calculated according to the maximum axial displacement at fracture section. **Results** Under the same axial loads, the compression stiffness was basically the same by using unicortical screw with over 75% length or bi-cortical screw. With the screw length increasing, the maximum stress of callus was decreased gradually during the period of early healing; while the maximum stress of distal screws was increasing gradually with the increase of screw length at middle and last period of fracture healing, and the stress of distal bi-cortical screw was the largest. **Conclusions** Using the unicortical distal locking screws with at least 75% length can not only produce early stability, but also avoid extensor tendon injuries due to dorsal screw prominence.

Key words: Distal radius fracture; Cortical screws; Biomechanics; Finite element analysis; Stress

收稿日期:2013-06-08; 修回日期:2013-07-29

基金项目:国家科技部 863 项目(2012AA02A603), 国家自然科学基金资助项目(81171765)。

通信作者:张美超, 副教授, 硕士研究生导师, E-mail: zmc@fimmu.com。

桡骨远端骨折在临床上较为常见,约占全部骨折的20%。传统上多采用手法复位后石膏或夹板固定,且大多数桡骨远端骨折确实可以通过手法复位结合外固定治疗获得满意效果。但是对于桡骨远端不稳定骨折,由于局部稳定性丧失,且患处肿胀明显,特别是骨质疏松患者桡骨远端多呈粉碎性骨折,并多伴有关节面塌陷以及掌倾角、尺偏角丢失,仅行保守治疗常常不能维持稳定,此时需要采用切开复位内固定进行治疗。临床上内固定方法较多,但最常见的是掌侧锁定钢板固定^[1-4],其术后可以早期行腕关节功能锻炼,避免了保守治疗长时间外固定造成的腕关节僵硬、畸形、功能受限等症状^[3,5]。

尽管掌侧固定优势明显,但是伸肌腱炎、伸肌腱断裂损伤等并发症仍然存在,这主要是由于桡骨远端双皮质螺钉穿透对侧皮质对伸肌腱长期慢性刺激造成^[6-7]。桡骨远端是否可采用单皮质螺钉固定还存在争议。如果与双皮质螺钉相比,两者的固定强度没有显著差异,则临床上使用单皮质螺钉固定就可极大减少螺钉背侧穿出的几率,避免伸肌腱损伤并发症的发生。本实验通过有限元法分析不同长度

单双皮质螺钉固定系统的压缩刚度及螺钉和骨痂应力分布情况,评价不同长度单双皮质螺钉固定系统的稳定性及术后愈合情况,为桡骨远端骨折手术治疗及术后康复提供生物力学依据。

1 材料与方法

1.1 建立桡骨远端不稳定骨折掌侧锁定钢板固定的三维有限元模型

选取一名25岁健康志愿者,经X线、B超检查排除桡骨损伤、肿瘤、畸形变等病变,随后进行前臂螺旋CT扫描,仪器由广州军区总医院影像中心提供。将CT数据以dicom格式保存并导入Mimics 14.11(Materialise公司,比利时),设定适当的灰度阈值,通过图像分割,区域增长等操作建立桡骨三维模型(见图1(a)),数据以二进制stl格式导入逆向工程软件Geomagic Studio 2012(Geomagic公司,美国)进行光滑、除噪处理,经过Polygon Phase的图形缩放和布尔操作处理,最后拟合成Nurbs曲面,建立含有皮质骨和松质骨的桡骨三维模型(见图1(b)),以iges格式输出。

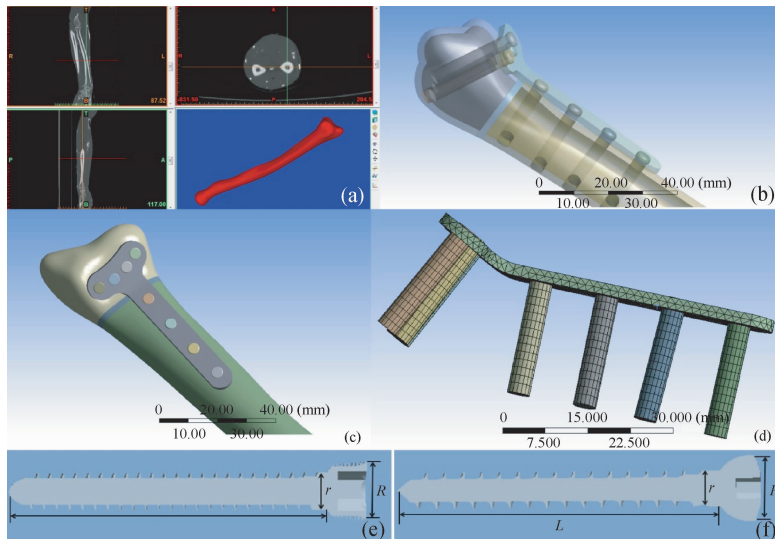


图1 桡骨远端不稳定骨折掌侧锁定钢板固定的三维有限元模型 (a)在Mimics 14.11中建立桡骨三维模型,(b)含有皮质骨和松质骨的桡骨三维模型,(c)含有骨痂的桡骨三维模型,(d)钢板螺钉模型网格划分图,(e)远端双皮质锁钉截面图($L=28\text{ mm}$, $r=3.5\text{ mm}$, $R=4.8\text{ mm}$),(f)皮质骨螺钉截面图($L=22\text{ mm}$, $r=3.5\text{ mm}$, $R=6.0\text{ mm}$)(L :螺钉长度, r :螺钉直径, R :钉头直径)

Fig.1 3D finite element models of unstable distal radius fracture fixed by volar locking plate (a) 3D model of the radius in Mimics 14.11, (b) Distal radius fracture model with cortical and cancellous bone, (c) Distal radius fracture model with callus, (d) Meshed modeling of locking plate and screws, (e) The cross-sectional view of distal bicortical locking screw ($L=28\text{ mm}$, $r=3.5\text{ mm}$, $R=4.8\text{ mm}$), (f) The cross-sectional view of cortical screw ($L=22\text{ mm}$, $r=3.5\text{ mm}$, $R=6.0\text{ mm}$) (L : screw length, r : screw diameter, R : screw head diameter)

实验选用小正 T 解剖型锁定钢板系统(大博颖精公司,厦门),在 ProE 5.0 三维绘图软件(PTC 公司,美国)中分别建立 T 形钢板和不同类型螺钉(见图 1(d)、(e)、(f)),并将其适当简化处理,与建好的桡骨三维模型进行装配,装配体以 x_t 格式导入 ANSYS Workbench14.0 (ANSYS 公司,美国)中,在几何建模(Design Modeler)模块中进行拉伸、面融合、布尔等操作,建立含有骨痂的三维骨折模型(见图 1(c));在设计仿真(Design Simulation)模块中对几何模型进行材料分配、网格划分、设定边界条件和加载,最后进行有限元求解分析。

1.2 材料生物力学参数

在有限元计算不影响最终结论的前提下进行如下假设:皮质骨、松质骨、骨痂及钢板螺钉假设为均质、各向同性线弹性材料(见表 1),并根据文献设定相关的材料属性^[8],钢板及螺钉采用 ANSYS Workbench 材料库中钛合金材料属性;给予骨痂不同材料属性来模拟术后骨折愈合的不同时期^[9];桡骨远端切除 2 mm 断面来模拟不稳定性桡骨远端骨折^[10],以消除骨折面对接触结果的影响。

表 1 三维有限元模型各部分材料参数

Tab. 1 Material properties of the 3D model

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨 ^[8]	13 800	0.3
松质骨 ^[8]	690	0.3
钢板及螺钉	96 000	0.36
前期骨痂 ^[9]	0.2	0.167
后期骨痂 ^[9]	1 000	0.3

1.3 边界条件、加载和单元划分

近端桡骨小头完全约束,使其全部节点自由度为 0,远端关节面分别施加 50 ~ 250 N 轴向加压载荷。螺钉与钢板之间设为非对称绑定接触,公式为罚函数法,并设置相应的法向刚度及接触容差值;螺钉与骨道之间设为非对称摩擦接触,摩擦系数设为 0.65^[11],公式为增强拉格朗日法;皮质骨、松质骨及骨痂组成多体部件,从而使各部件单元共节点,且相互无接触;锁定钢板与桡骨面不考虑加压摩擦接触。皮质骨、松质骨及钢板采用四面体法进行网格划分,

并保留中间节点,螺钉采用扫掠法进行网格划分,并调节整体网格参数(见图 1(d))。

1.4 有限元计算分析

使用 ANSYS 14.0 大型通用有限元软件,分别计算在生理载荷下不同长度单皮质螺钉及双皮质螺钉固定时骨折断面的最大轴向位移,根据骨折断面刚度曲线计算不同固定方式下的轴向压缩刚度;分析骨折愈合不同时期骨痂及桡骨远端螺钉的应力分布情况。

1.5 收敛性检验

本研究以远端螺钉的等效应力(equivalent stress, EQV stress)峰值作为检验指标,当模型网格自动细化后,螺钉平均主应力峰值变化幅度小于 3%时,则可认为有限元分析收敛,结果具有可靠性^[12]。本实验最大网格细化次数为 4,细化深度为 2,模型结果均可得到自动收敛的解。

2 结果

2.1 不同固定方式下骨折断面最大轴向位移及轴向压缩刚度

随着轴向载荷阶段性的增加,骨折断面最大轴向位移逐渐增加;对于相同载荷,随着螺钉长度增加,骨折断面最大轴向位移逐渐减少,50% 长度螺钉、75% 长度螺钉及双皮质螺钉固定的轴向压缩刚度分别为 174.47、210.72、215.10 N/mm;与双皮质螺钉相比,75% 长度单皮质螺钉固定压缩刚度下降不到 5%,50% 长度单皮质螺钉固定压缩刚度下降显著。75% 以上长度单皮质螺钉的轴向压缩刚度与双皮质螺钉相比基本无差异(见图 2)。

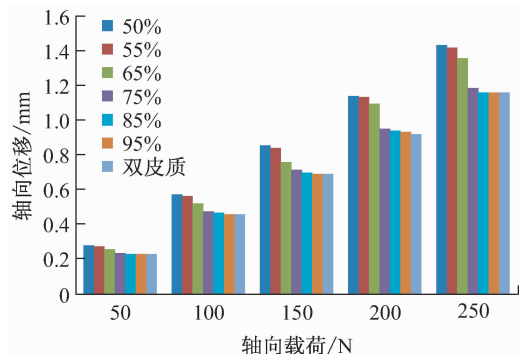


图 2 不同长度锁钉固定时骨折断面最大轴向位移

Fig. 2 Axial displacement of fracture section fixed by locking screws with different length

2.2 骨折愈合前期,不同固定方式下骨痂处的 Von Mises 应力

随着轴向载荷阶段性的增加,骨痂处最大 Von Mises 应力逐渐增加;对于相同载荷,随着螺钉长度增加,骨痂处最大应力逐渐减少(见图 3)。

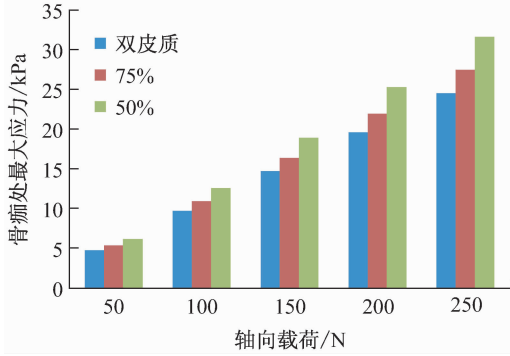


图 3 骨折愈合早期骨痂处最大应力
Fig. 3 The maximum stress of callus during early fracture healing

2.3 骨折愈合中后期,桡骨远端螺钉的 Von Mises 应力

随着轴向载荷阶段性的增加,桡骨远端螺钉最大 Von Mises 应力逐渐增加;对于相同载荷作用,不同长度螺钉的最大应力出现部位基本相同,远端双皮质螺钉所受应力最大(见图 4),应力主要集中在螺钉尾端近钉孔处(见图 5)。

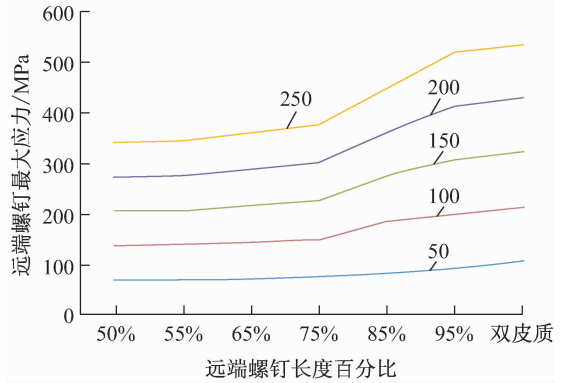


图 4 骨折愈合后期不同长度远端锁钉最大应力
Fig. 4 The maximum stress of distal locking screws with different length during later fracture healing

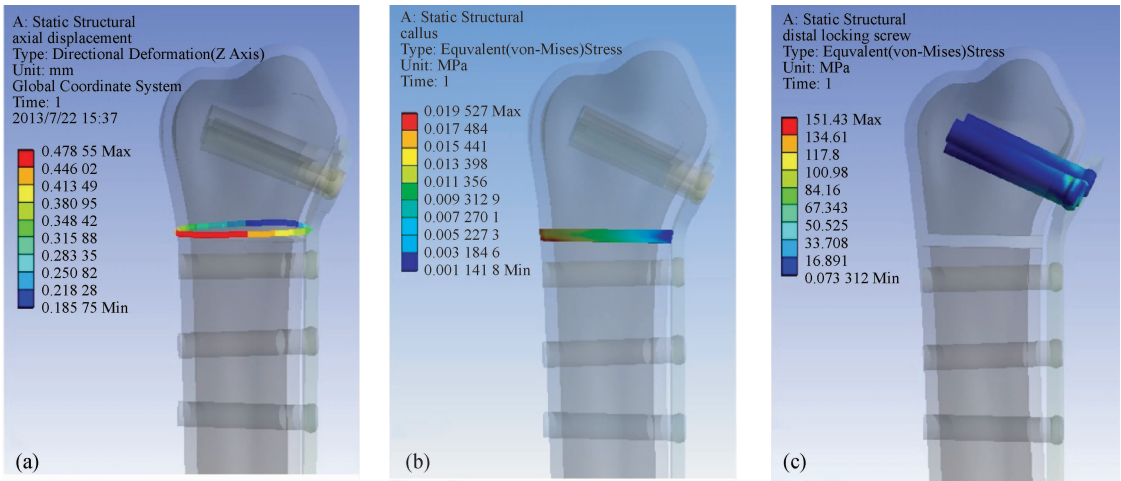


图 5 当轴向载荷为 100 N、75%长度单皮质螺钉固定时骨折断面位移 (a)、骨痂处应力 (b)、桡骨远端螺钉的应力云图 (c)
Fig. 5 Displacement of fracture section (a), stress of callus (b) and stress of distal radius screw (c) when fixed by unicortical screw with 75% length under the axial load of 100 N

3 讨论

近年来,随着桡骨掌侧锁定钢板临床应用的逐渐增加,术后早期伸肌腱并发症引起了临床医生的关注^[6-7,13],临床上导致伸肌腱损伤的原因主要有两

个:(1) 术中钻孔时钻头穿过了对侧皮质,(2) 临床上桡骨远端双皮质螺钉的应用。一方面在手术中测量合适的螺钉长度较困难,因为桡骨远端骨折一般背侧粉碎移位,复位后很难准确用测深器测量到对侧皮质的距离;而且由于背侧 Lister 结节的遮挡,侧

位 X 片不易看清背侧螺钉尖的具体位置。另一方面由于桡骨远端主要是松质骨,皮质骨菲薄,故很难刚好打到对侧皮质而不穿出,尤其对于关节内骨折,一般螺钉尖超过对侧皮质 1~2 mm,使得固定更牢靠。虽然螺钉尖相对光滑,而且只是轻微地穿过对侧皮质,但是随着时间的累积,仍然可以对伸肌腱造成慢性刺激,导致伸肌腱损伤。本研究主要讨论双皮质螺钉这个影响因素,并与单皮质螺钉对比,进行有限元分析。

已有大量研究对桡骨远端钢板固定系统稳定性的影响因素进行了分析^[1,4,14-17],但针对不同长度螺钉固定的研究鲜有报道。由于肢体早期功能锻炼可避免肌肉萎缩和关节僵硬等并发症的发生,本实验通过建立不同长度螺钉固定桡骨远端的三维有限元模型,模拟术后早期主动的关节功能锻炼,以分析不同长度螺钉对整个固定系统稳定性的影响情况。由于早期腕部所受到的生理应力刺激主要是轴向压力^[7,17],故只对模型进行轴向加压加载。由于骨折术后早期主动功能锻炼要求桡骨远端承受载荷不超过 100 N,手指和腕部的混合力不超过 250 N^[7],故实验模拟中对远端关节面分别施加 50~250 N 轴向加压载荷。

本实验通过赋予骨痂不同的材料属性来模拟骨折愈合的不同时期。在骨折的愈合早期,主要是骨折断端周围血肿机化,被肉芽组织取代,故前期骨痂被赋予肉芽组织材料属性。在骨折愈合过程中,固定器械对骨痂的应力遮挡在所难免,应力遮挡是影响骨折愈合最重要的负面要素之一。应力遮挡的大小不仅取决于固定器械的应力分流,更重要的是取决于骨折断端间的应力传导,力的传导刺激可促进血管新生、生长以及重塑,实现血液循环的改善^[18],是骨痂形成得以重复和延续的基本条件。因此,本实验通过分析骨痂处的应力值来间接反映骨折断端间的应力传导。

在术后的功能恢复锻炼中,螺钉-骨表面在载荷作用下会产生一定的应力,导致螺钉周围骨质发生应变;由于螺钉尾端形状的突变,使得该处易产生应力集中,螺钉周围的骨质逐渐吸收变薄,继而可能引发螺钉松动。因此,本实验通过分析骨折愈合后期远端螺钉周围的应力分布情况,比较不同长度螺钉固定时螺钉松动的可能性大小。

3.1 实验结果的分析与临床意义

由图 2 可知,对于相同轴向压缩载荷,至少 75% 长度单皮质螺钉固定时骨折断面的最大轴向位移与双皮质螺钉固定相比基本无差异,说明其固定系统压缩刚度基本相同,固定强度没有明显差异。50% 长度单皮质螺钉、75% 长度单皮质及双皮质螺钉固定的系统压缩刚度分别为 174.47、210.72、215.10 N/mm,对于双皮质螺钉而言,75% 长度单皮质螺钉固定系统刚度下降不到 5%,但是 50% 长度单皮质螺钉固定时压缩刚度仅为双皮质螺钉固定时的 80%,该结果与 Wall 等^[7]生物力学实验分析结论一致。本研究结果提示,在临床上使用掌侧锁定钢板治疗桡骨远端不稳定骨折时,采用至少 75% 长度单皮质螺钉固定桡骨远端可以维持术后早期稳定性。

由图 3 可知,在骨折愈合早期,螺钉长度的增加使得骨痂处最大 Von Mises 应力减少,最大应力值不超过 35 kPa。Claes 等^[19]认为,骨痂处的应力刺激小于 1 MPa 可促进成骨分化,其中 0~0.15 MPa 主要是膜内成骨,而 0.15~1 MPa 是软骨内成骨,故本试验中骨痂处应力值都可促进原始骨痂形成,且在此范围内的应力越大,越能促进骨痂生长。75% 长度单皮质螺钉固定与双皮质螺钉固定相比,骨痂处最大应力相差约 1 kPa,说明 75% 长度单皮质螺钉固定时骨折断端间的应力传导多,使愈合骨逐渐承受正常应力,更有利于原始骨痂形成,减少了术后骨不连与再骨折的发生。因此,在不影响术后早期稳定性的条件下,75% 长度单皮质螺钉固定更有利于骨折早期骨痂愈合。

由图 4 可知,在骨折愈合的后期,桡骨远端双皮质螺钉所受应力最大,应力主要集中在螺钉尾端近钉孔处(见图 5(c))。在术后的康复活动中,螺钉应力集中可使螺钉周围骨质变薄吸收,螺钉在间断性生理应力作用下可能会逐渐松动。由于双皮质螺钉所受应力最大,故术后双皮质螺钉最有可能发生松动现象。

总之,在临床上使用掌侧锁定钢板固定桡骨远端不稳定骨折时,采用 75% 以上长度单皮质螺钉固定桡骨远端既可以维持术后早期稳定性,避免伸肌腱损伤并发症的发生,也更有利于术后骨痂早期愈合,同时可减少螺钉松动的可能性。

3.2 结果误差分析与实验的不足

本研究计算的压缩刚度与 Wall 等^[7]力学实验结果相比偏小,可能有以下几个原因:(1)假设桡骨为均质的各向同性线弹性材料,但实际上骨组织为非均质各向异性复合材料,其各方向上的弹性模量不尽相同,同时还需考虑塑性等因素;(2)实验中手动给皮质骨和松质骨赋予的材料属性,可能与实际相比偏小;(3)远端皮质骨厚度设置均一,而实际桡骨远端皮质骨是厚薄不均的;(4)为了提高有限元网格的质量,模型中使用了没有螺纹的简化螺钉,忽略了螺纹与骨质的密切咬合,从而降低了系统的刚度。不过本研究计算结果仍与实验结果较为吻合,证明简化较为合理,计算结果具有意义。

本文只研究了轴向压缩载荷的影响,但是在术后早期关节的功能锻炼中,远端桡骨还受到掌侧、背侧载荷以及扭转力的作用,故还需开展进一步的研究。另外未考虑腕关节、下尺桡骨关节部位其他组织(如肌肉、韧带)对桡骨的影响,故如何进一步提高本研究中有限元分析的质量是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Sobky K, Baldini T, Thomas K, *et al.* Biomechanical comparison of different volar fracture fixation plates for distal radius fractures [J]. *Hand*, 2008, 3(2): 96-101.
- [2] Gondusky JS, Carney J, Erpenbach J, *et al.* Biomechanical comparison of locking versus nonlocking volar and dorsal T-plates for fixation of dorsally comminuted distal radius fractures [J]. *J Orthop Trauma*, 2011, 25(1): 44-50.
- [3] Kandemir U, Matityahu A, Desai R, *et al.* Does a volar locking plate provide equivalent stability as a dorsal nonlocking plate in a dorsally comminuted distal radius fracture? a biomechanical study [J]. *J Orthop Trauma*, 2008, 22(9): 605-610.
- [4] Muller LP, Klitscher D, Rudig L, *et al.* Locking plates for corrective osteotomy of malunited dorsally tilted distal radial fractures: A biomechanical study [J]. *J Hand Surg Br*, 2006, 31(5): 556-561.
- [5] Jakubietz MG, Gruenert JG, Jakubietz RG. Palmar and dorsal fixed-angle plates in AO C-type fractures of the distal radius: Is there an advantage of palmar plates in the long term [J]. *J Orthop Surg Res*, 2012, 7(1): 8.
- [6] Hattori Y, Doi K, Sakamoto S, *et al.* Delayed rupture of extensor digitorum communis tendon following volar plating of distal radius fracture [J]. *Hand Surg*, 2008, 13(3): 183-185.
- [7] Wall LB, Brodt MD, Silva MJ, *et al.* The effects of screw length on stability of simulated osteoporotic distal radius fractures fixed with volar locking plates [J]. *J Hand Surg Am*, 2012, 37(3): 446-453.
- [8] Anderson DD, Deshpande BR, Daniel TE, *et al.* A three-dimensional finite element model of the radiocarpal joint: Distal radius fracture step-off and stress transfer [J]. *Lowa Orthop J*, 2005, 25: 108-117.
- [9] Gonzalez-Torres L A, Gomez-Benito M J, Doblare M, *et al.* Influence of the frequency of the external mechanical stimulus on bone healing: A computational study [J]. *Med Eng Phys*, 2010, 32(4): 363-371.
- [10] Moss DP, Means KJ, Parks BG, *et al.* A biomechanical comparison of volar locked plating of intra-articular distal radius fractures: Use of 4 versus 7 screws for distal fixation [J]. *J Hand Surg Am*, 2011, 36(12): 1907-1911.
- [11] 王成焘. 人体生物摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 428-432.
- [12] 漆伟, 雷伟, 严亚波. 椎弓根螺钉长度变化对螺钉-骨复合体模型应力影响的三维有限元分析研究[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(3): 206-211.
- Qi W, Lei W, Yan YB. Three dimensional finite element analysis of stress distribution on continuously varying of length of pedicle screw [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 206-211.
- [13] Maschke SD, Evans PJ, Schub D, *et al.* Radiographic evaluation of dorsal screw penetration after volar fixed-angle plating of the distal radius: A cadaveric study [J]. *Hand*, 2007, 2(3): 144-150.
- [14] Liporace FA, Kubiak EN, Jeong GK, *et al.* A biomechanical comparison of two volar locked plates in a dorsally unstable distal radius fracture model [J]. *J Trauma*, 2006, 61(3): 668-672.
- [15] Levin SM, Nelson CO, Botts JD, *et al.* Biomechanical evaluation of volar locking plates for distal radius fractures [J]. *Hand*, 2008, 3(1): 55-60.
- [16] Mehling I, Muller LP, Delinsky K, *et al.* Number and locations of screw fixation for volar fixed-angle plating of distal radius fractures: Biomechanical study [J]. *J Hand Surg Am*, 2010, 35(6): 885-891.
- [17] Koh S, Morris RP, Patterson RM, *et al.* Volar fixation for dorsally angulated extra-articular fractures of the distal radius: A biomechanical study [J]. *J Hand Surg Am*, 2006, 31(5): 771-779.
- [18] 秦岭. 力学刺激促进成骨和骨再生[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(2): 129-132.
- Qin L. Mechanical stimulation enhances osteogenesis and bone generation [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 129-132.
- [19] Claes LE, Heigele CA. Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing [J]. *J Biomech*, 1999, 32(3): 255-266.