

文章编号:1004-7220(2011)01-0142-08

利用 X 线平片分析骨折愈合的等效最弱截面

钟红刚^{1,3}, 刘斌¹, 张万强¹, 董福慧¹, 孟和¹, 钱民全²

(1. 中国中医科学院 望京医院(原骨伤科研究所)生物力学实验室,北京 100700;

2. 中国科学院 力学研究所,北京 100190;3. 北京工业大学 生命科学与生物工程学院,北京 100124)

摘要:目的 更多地提取 X 线平片中包含的骨折愈合力学信息,为临床骨折愈合治疗过程定量判断愈合程度提供有效并且简便实用的方法。方法 12 只家兔胫骨中部横断造成骨折模型,并穿针进行滑动固定。利用力传感器在胫骨中部体表从前向后横向手动加载。通过安装在滑动固定器上的微位移传感器测量断端活动位移。采用计算机数据采集系统记录加载力值 P 和滑动架滑动位移 ΔL 关系曲线。以 $K = P/\Delta L$ 值代表带滑动固定器兔胫骨整体等效抗弯刚性。每周测量 1 次。采用经过数字化改造的手提 X 线机每周拍摄正、侧位 X 线片;在 delphi 软件开发环境中编写图像处理和计算程序。在 X 线正、侧位片灰度分析基础上,沿胫骨轴向扫描计算寻找等效最弱截面并计算其等效抗弯截面惯性矩,得到定量的抗弯刚度和断裂强度判据。结果 家兔骨折愈合拆架时间分布在 29 ~ 41 d。在正侧位 X 线片上获得计算机模拟的等效最弱截面分界线,且得到其抗弯截面惯性矩。最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值随愈合时间逐渐升高。侧位片比值术后第 1 周为 (0.31 ± 0.17) ,第 2 周为 (0.34 ± 0.13) ,第 3 周为 (0.43 ± 0.20) ,第 4 周为 (0.56 ± 0.23) 。正位片比值术后第 1 周为 (0.40 ± 0.19) ,第 2 周为 (0.47 ± 0.16) ,第 3 周为 (0.56 ± 0.20) ,第 4 周为 (0.66 ± 0.11) 。家兔骨折胫骨在体抗弯刚性测试所得 K 值术前平均为 $(3.976 \pm 4.986) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,术后第 1 周为 $(0.679 \pm 1.026) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,术后第 2 周为 $(2.115 \pm 3.233) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,术后第 3 周为 $(3.459 \pm 4.723) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,术后第 4 周为 $(4.788 \pm 4.831) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。从 1 ~ 4 周愈合过程,X 线片计算得到的最弱抗弯截面惯性矩和最强抗弯截面惯性矩的比值与 K 值之间具有很好的相关性。结论 外骨痂生长有较强规律性,并且在普通正侧位 X 线平片易于辨认。从骨折近端和远端分别生长的骨痂在愈合进程中逐渐合拢,最终弥合。本文所述方法较好地反映了实际读片感觉。

关键词: X 射线;骨折愈合;最弱截面;抗弯刚性;力学性能;影像分析;生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Using radiographs to analyze equivalent weakest transverse inter-face of fracture healing

ZHONG Hong-gang^{1,3}, LIU Bin¹, ZHANG Wan-qiang¹, DONG Fu-hui¹, MENG He¹, QIAN Min-quan² (1. Biomechanics Laboratory, Institute of Orthopaedics and Traumatology, China Academy of Chinese Medical Science, Beijing 100700, China; 2. Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 100190, China; 3. Institute of Life Science and Biomedical Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Objective An effective but simple method for quantifying the fracture healing progress was provided to obtain more information on fracture healing mechanics from plain X-ray film. Method Twelve rabbits were used for experimentally osteotomy at the middle tibiae, each of which was fixed by the sliding fixator with four pins of 1.5 mm diameter, with mini transducer of displacement measuring the sliding micro movement between the fractured bone fragments, denoted as ΔL . The bending rigidity, denoted as $K = P/\Delta L$, of the rabbits' tibia (with

收稿日期:2010-09-01; 修回日期:2010-10-28

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(7072050)。

通讯作者:钟红刚, E-mail: greatgun_2202@hotmail.com。

sliding fixator together) were recorded by computer data assembling system once a week, where P was the load on the fracture site from anterior of the tibia by manual operation of a loading transducer. The anterior-posterior and lateral radiographs were also taken every week by digitally upgraded X-ray radioscope. The effective weakest transverse curved interfaces were found, and the equivalent bending moments of inertia were calculated from the radiographs automatically, by gray scan along the longitudinal axis of the tibia upon the image programs edited in Delphi programming environment. And they were used for quantitative description of the rigidity of the healing bone. Results The sliding fixators were removed in 29~41 days after the osteotomy. Ratios of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia for each fracture bone were calculated. And they were found to increase via the healing time. The means of the ratios of all twelve rabbits calculated from lateral radiographs were (0.31 ± 0.17) for the first week, (0.34 ± 0.13) for the second week, (0.43 ± 0.20) for the third week, and (0.56 ± 0.23) for the fourth week after the osteotomy, respectively. From anterior-posterior radiographs, the means of the ratios were (0.40 ± 0.19) , (0.47 ± 0.16) , (0.56 ± 0.20) , and (0.66 ± 0.11) , respectively. These ratios were significantly correlated with the bending rigidity K of the fracture tibia of the rabbits. The means of K value was $(3.976 \pm 4.986) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ before the operation, and $(0.679 \pm 1.026) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ for the first week, $(2.115 \pm 3.233) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ for the second week, $(3.459 \pm 4.723) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ for the third week and $(4.788 \pm 4.831) \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ for the fourth week after the operation, respectively. Conclusions The growth of external callus has its own rules. It can be distinguished from plain radiographs easily, and it grows from either side of the fracture site and meets together gradually, filling up the gap at the fracture site at last. The methods described in this paper could reflect the feeling when reading the radiographs.

Key words: X ray; Fracture healing; Weakest transverse interface; Bending rigidity; Mechanical properties; Image analysis; Biomechanics

X 线平片是骨折愈合的常规评判方法之一,通常结合患者功能恢复和医生经验判断愈合时间。但是受空间结构重叠投影干扰,仅靠平面图像,往往观察不到骨折愈合过程的精细变化。依靠计算机 X 线断层扫描技术可以较好分解空间重叠影像^[1]。但是由于费用高,且一次普通 CT 扫描局部 X 射线辐射量相当于平面投照的百倍量级^[2],临床很少用于单纯骨折愈合评价。这导致临床实际中常常出现过度保护、推迟拆除固定^[3]。按照骨折愈合应力适应性理论^[4],过度替代会使愈合的速度减慢和质量下降,同时会带来相关的并发症和继发问题。

随着医疗模式向生物-心理-社会生活方式的过渡,对骨折愈合治疗过程的量化监测,回复自然愈合模式,成为医生和患者共同期望。邹炳曾等^[5]通过 X 线平片图像分析,获得骨折线局部的灰度分布,并通过与正常部位骨灰度对比得到其随骨折愈合进展的变化规律。董福慧^[6]对骨痂的质和量的关系进行辩证分析,认为骨裂纹按“结构最弱处发生断裂”规律走行。

本文从裂纹分析角度出发,采用家兔胫骨穿针滑动固定骨折愈合模型^[7],利用骨折局部骨痂形成过程中形态和灰度变化的特点,通过等效最弱截面

形态及其等效抗弯截面惯性矩评价骨折愈合程度,结合在体抗弯测试,得到较为精细的愈合过程定量描述。

1 材料和方法

1.1 实验动物模型

12 只成年大耳白实验家兔(平均体重 $(2.57 \pm 0.23) \text{ kg}$,雌雄不计)进行胫骨横断骨折造模,穿针进行滑动固定。横断型骨折线位于兔右侧胫骨中部,上、下骨折段各穿 2 根 1.5 mm 克氏针。滑动固定器固定。操作方法详见文献[7]。实验兔手术苏醒后即自由活动。滑动固定器允许骨折断端轴向活动,断端承受自然生理活动作用力。

1.2 X 线片分析

采用经过数字化改造的手提 X 线机每周拍摄正、侧位 X 线片。所采用的手提 X 线机为上海国嘉实业股份有限公司 FZX03 型。感光屏直径 60 mm。加装光学摄像头,经数字图像采集器,输入计算机。采样速率 30 帧/s。由连续 50 帧平均得到 1 张 768×576 像素分辨率的 X 线平片,灰度 256 级。采用特制的装置固定家兔确定正侧位片方向。家兔无需麻醉,拍摄过程(小于 2 s)中保持骨折骨静止。X 线

拍摄条件为球管电压 45.2 kV, 电流 0.46 mA。

等效最弱截面确定方法: 沿原始造模骨折线确定 1 条扫描线, 这条线一般垂直于胫骨轴线。程序在这条扫描线每一个像素点沿胫骨轴向上下约 1 cm 长度内(因骨痂大小和骨折线造模偏斜范围具体确定)自动寻找灰度最小值点和灰度最大值点, 分别得到如图 1(b) 箭头所示折线(骨质最薄弱处投影点连线, 即等效最弱截面的投影)和如图 1(c) 箭头所示折线(骨质最坚强处投影点连线, 即局部等效最强截面的投影)。所得到的等效最弱截面通常不是平面, 而是折曲面。

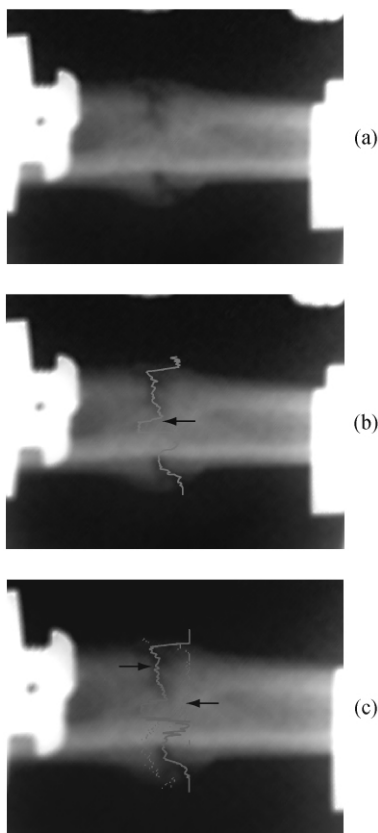


图 1 家兔胫骨横断骨折造模穿针滑动固定 3 周末侧位片 (a) 原图, (b) 等效最弱界面(箭头所示), (c) 等效最强界面(箭头所示)
Fig. 1 Lateral radiograph of healing rabbit tibia transverse fracture at the third week fixed by the sliding fixator (a) Original picture, (b) The equivalent weakest interface (arrow), (c) The equivalent strongest interface(arrow)

等效最弱抗弯截面惯性矩的确定方法: 由于 X 线灰度值与 X 线穿过的骨质厚度在一定范围内有线性关系, 可以采用灰度值代替骨质厚度尺寸。因

而采用灰度值与此点离中性轴的距离平方的乘积代表这一点所在的厚度方向的微元条带的惯性矩。将沿图 1(b) 箭头所示折线各点所在的微元条带的惯性矩求和, 得到骨折线处等效最弱抗弯截面惯性矩。在正位片上获得左右方向等效最弱抗弯截面惯性矩; 在侧位片上得到前后方向等效最弱抗弯截面惯性矩。同样方法沿图 1(c) 箭头所示折线获得局部等效最强抗弯截面惯性矩(灰度值 × 像素 × 像素)。

以上方法采用 delphi 程序编写图像处理和计算程序自动执行。通过 X 线正、侧位片灰度, 沿胫骨轴向扫描计算等效最弱截面的等效抗弯截面惯性矩^[8], 得到定量的抗弯刚性数据文件。详细计算过程如下。

在数字化 X 线片上的一个像素的灰度微小变化 ΔD_i , 与射线穿过的骨质的厚度 ΔT_i 有正比关系^[9], 即

$$\Delta T_i = \alpha \Delta D_i \quad (1)$$

式中: α 为常数, 与骨材料吸收系数、散射系数和 X 线照相曝光曲线对数斜率等有关。

从边界开始, 向对侧沿着 B1 - B2 线求和, 可得到各点对应的条带微元的长度, 也就是 X 线穿过的骨质的厚度

$$T_j = \alpha \sum_{i=0 \rightarrow j} \Delta D_i + T_0 \quad (2)$$

式中: T_0 为边界点 B1 对应的骨质厚度, 此处, $T_0 = 0$ 。而 $\sum_{i=0 \rightarrow j} \Delta D_i$ 数值实际上就等于第 j 点的灰度值 G_j 。单位换成面积(像素²)。

这一条带微元长度 T_j 不一定有连续的几何长度。宽度取为一个像素, 则包含有效骨质的面积 $\Delta F_j = T_j \times 1$ 。如图 2 所示。A - A 线是材料力学中性层所在位置。AB 线段就是面积微元 ΔF_j 到中性层的距离, 其值为 $r_j = |AB|$, 单位为像素。则微元 ΔF_j 对中性层的惯性矩为 $r_j^2 \Delta F_j$ 。相对于 A 点, 分为两部分计算, 分别计算 B1 ~ A 点和 A ~ B2 点所界定的横截面的惯性矩。总的截面惯性矩 J_z 表达式如下:

$$J_z = \sum_{j=|B1A| \rightarrow 0} r_j^2 \Delta F_j + \sum_{j=0 \rightarrow |B2A|} r_j^2 \Delta F_j \quad (3)$$

将 (2) 式代入 (3) 式, 得到式 (4) 如下:

$$J_z = \alpha \sum_{j=|B1A| \rightarrow 0} (r_j^2 (\sum_{i=0 \rightarrow j} \Delta D_i)) +$$

$$\alpha \sum_{j=0 \rightarrow |B2A|} (r_j^2 (\sum_{i=0 \rightarrow j} \Delta D_i)) \quad (4)$$

亦即

$$J_z = \alpha \sum_{j=1 \rightarrow |B1A|} (r_j^2 G_j) + \alpha \sum_{j=0 \rightarrow |B2A|} (r_j^2 G_j) \quad (5)$$

A 点沿着 B1 - B2 线从 B1 向 B2 移动。每移动一次 A 点, 利用(5)式两部分分别计算 B1 ~ A 点和 A ~ B2 点所界定的横截面的惯性矩。当他们相等时, A 点就确定下来了。上下两半惯性矩相加就得到整个截面的惯性矩。

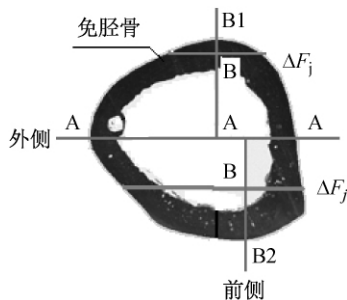


图2 截面惯性矩计算图示及条带微元^[8] ΔF_j
 Fig. 2 The calculation of inertia moment integration and differential strip area^[8]

1.3 家兔胫骨在体抗弯刚性测试

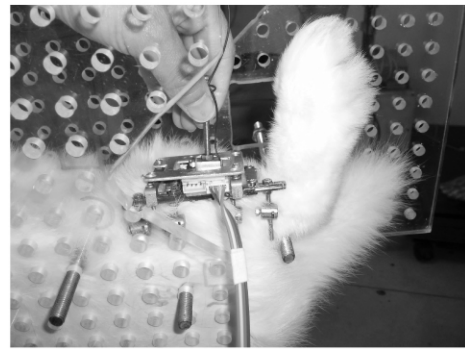
在骨折造模之前, 预先安装滑动固定器(其上安装有微位移传感器)。膝关节弯曲 90°, 以股骨和胫骨下端后侧为简单支撑, 在胫骨中部向后手动加载, 形成 3 点弯曲(见图 3(a)), 并得到带滑动固定器的兔胫骨整体抗弯刚性(见图 3(b))。采用计算机数据采集系统记录加载力值 P 和滑动架滑动位移 ΔL 关系曲线。造模截骨后, 每周测量一次愈合中的带滑动固定器兔胫骨整体等效抗弯刚性, 以 K = P/ΔL 代表。取 3 个加载力—位移波形取斜率, 计算平均值。K 值反映骨折愈合力学功能恢复。

1.4 家兔胫骨标本三点弯测试

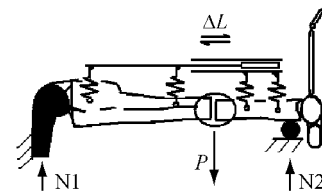
采用长春产 WD-4 材料电子万能试验机对所取双侧胫骨标本进行前后方向 3 点弯测试, 计算机测控系统自动记录载荷—挠度曲线, 获得愈合骨的抗弯刚性和强度。测试在标本离体后 24 h 内完成。其间保持标本湿润。双侧对比分析愈合质量。加载速率 2 mm/min, 支承跨距 80 mm, 见文献[10]。

2 结果

本文实验家兔骨折愈合拆架时间分布在(29 ~



(a)



(b)

图3 家兔胫骨骨折愈合过程 3 点弯测试(a) 及其受力分析图(b)
 Fig. 3 *in vivo* three-point bending test of fractured rabbit tibia (a) and its force analysis schedule (b)

41) d. 拆架后均正常活动, 达到临床愈合。

2.1 X 线片分析结果

在正侧位 X 线片上获得计算机程序自动给出的等效最弱和最强截面在 X 线平片照射平面投影线(见图 1), 且得到其抗弯截面惯性矩。取各自最弱抗弯截面惯性矩(J_{z-min})与最强抗弯截面惯性矩(J_{z-max})的比值(见表 1, 图 4)。最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值随愈合时间逐渐升高。侧位片比值术后第 1 周为(0.31 ± 0.17), 第 2 周为(0.34 ± 0.13), 第 3 周为(0.43 ± 0.20), 第 4 周为(0.56 ± 0.23)。正位片比值术后第 1 周为(0.40 ± 0.19), 第 2 周为(0.47 ± 0.16), 第 3 周为(0.56 ± 0.20), 第 4 周为(0.66 ± 0.11)。结果表明, 最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值可以较好描述横断骨折愈合过程。表 2 中给出了按术后愈合时间(周)分组配对统计结果。

2.2 在体抗弯测试结果

12 只实验家兔中 7 号和 12 号家兔 6 周拆除滑动固定器, 其他 10 只都在 4 周末拆除(见表 3)。图 5 为截骨术前和术后 1 ~ 4 周 K 值随愈合时间变化。可见骨折骨(带滑动固定器)的抗弯刚性在截骨后大幅度降低, 随着愈合时间逐渐恢复。K 值

表1 最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值随愈合时间变化

Tab.1 The ratio of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia via healing time (weeks)

序号	侧位片惯性矩计算值(最弱 / 最强)				正位片惯性矩计算值(最弱/最强)			
	1周	2周	3周	4周	1周	2周	3周	4周
1	0.29	0.28	0.65	0.79	0.16	0.33	0.66	0.77
2	0.15	0.40	0.39	0.37	0.56	0.41	0.52	0.67
3	0.00	0.08	0.42	0.60	0.00	0.11	0.33	0.53
4*	0.23	0.59	0.26	0.34	0.36	0.52	0.63	0.58
5	0.25	0.33	0.53	0.62	0.44	0.54	0.56	0.72
6	0.66	0.51	0.47	0.72	0.68	0.69	0.64	0.79
7*	0.34	0.34	0.13	0.15	0.58	0.47	0.07	0.51
8	0.30	0.32	0.59	0.70	0.55	0.59	0.72	0.83
9	0.44	0.38	0.55	0.73	0.43	0.65	0.72	0.64
10	0.40	0.34	0.57	0.78	0.29	0.41	0.67	0.75
11	0.49	0.21	0.59	0.72	0.38	0.52	0.71	0.63
12*	0.21	0.30	0.03	0.20	0.38	0.43	0.44	0.51

注:* 数据在第3周时出现异常。原因可能是2~3周时期家兔活动增大,断端处于相变关键期,愈合易受外界饲养环境影响,例如固定器挂在兔笼金属网孔上

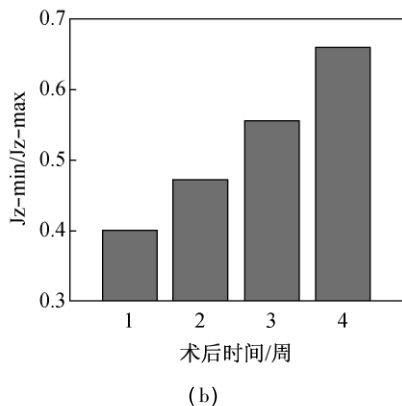
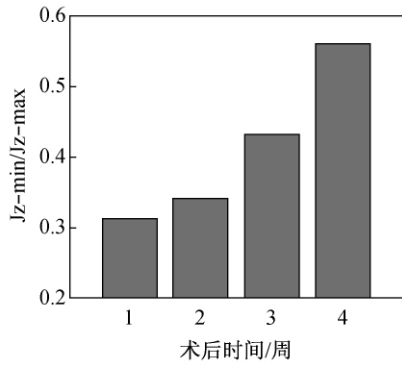


图4 最弱截面惯性矩与最强截面惯性矩的比值随愈合时间变化图 (a)侧位,(b)正位

Fig.4 The ratio of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia via healing time (a) From lateral radiograph ,(b) From anterior-posterior radiograph

表2 最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值术后愈合时间(周)分组配对统计结果

Tab.2 Paired t test results of the ratio of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia between groups of different healing time(weeks)

方向	配对	t 值	自由度	显著性(值)
侧位片	1—4周**	-3.800	11	0.003
	2—4周*	-2.643	11	0.023
	3—4周**	-5.726	11	0.000
正位片	1—2周*	-2.239	11	0.047
	1—4周**	-4.706	11	0.001
	2—4周**	-4.324	11	0.001
	3—4周*	-2.464	11	0.031

注:* P<0.05,有显著差异;** P<0.01,有极显著差异

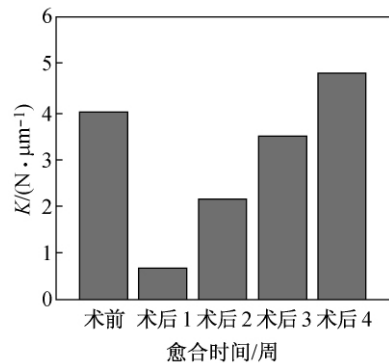


图5 K值随愈合时间(周)变化

Fig.5 K value via healing time (weeks)

表 3 K 值随愈合时间变化

Tab.3 K value via healing time (weeks)

序号	$K/(N \cdot \mu m^{-1})$						
	截骨前	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周	第 6 周
1	0.967	0.644	1.261	1.614	1.467		
2	17.062	0.105	0.209	0.608	1.996		
3		3.851	8.631	8.056	18.411		
4	1.555	0.307	0.268	0.284	1.379		
5	1.601	0.154	0.222	1.392	1.944		
6	1.205	0.562	1.539	1.369	3.339		
7*	2.199	0.052	0.343	0.771	0.591	1.179	2.502
8	1.695	0.147	1.111	2.754	1.813		
9	6.932	0.614	9.261	7.442	12.407		
10	5.037	0.755	1.284	14.700	5.495		
11	1.506	0.467	1.121	1.810	3.832		
12*	-	0.075	0.490	0.131	-	0.068	12.881

注:* 6w 拆除滑动架(其他 4w 拆除)

术前平均为: $(3.976 \pm 4.986) N/\mu m$; 术后第 1 周: $(0.679 \pm 1.026) N/\mu m$; 术后第 2 周: $(2.115 \pm 3.233) N/\mu m$; 术后第 3 周: $(3.459 \pm 4.723) N/\mu m$; 术后第 4 周: $(4.788 \pm 4.831) N/\mu m$ 。

对 K 值按周分组配对比较, 第 1 与第 4 周相比 $t = -2.894, n = 10, P = 0.016$, 有显著差异; 第 2 与第 4 周相比 $t = -3.05, n = 10, P = 0.012$, 有显著差异; 第 1 和第 3 周相比 $t = -3.05, n = 10, P = 0.012$, 有显著差异。

2.3 取材新鲜胫骨标本抗弯测试结果

12 只实验家兔双侧胫骨中, 1 只 4 周取材, 7 只 8 周取材, 3 只 18 周取材, 都在取材后 24 h 内完成 3 点弯测试; 1 只取材后用于其他观测, 未进行 3 点弯测试(见表 4)。从表 4 中数据可以看出, 刚度恢复比强度恢复更快。

3 讨论

文献 [5] 中采用局部 X 线灰度测量主要表达了随着愈合过程, 骨痂量的增加和骨痂材料密度的变化。在骨痂量虽然大, 密度也正常, 但在连续性不好的情况下, 例如增生性延迟愈合, 可能出现误判。本文探索骨折愈合等效最弱截面 X 线分析方法。目的是更多地提取 X 线平片中包含的愈合骨的断裂

力学信息, 从裂纹修复的角度定量描述骨折愈合的进程。

表 4 3 点弯测试结果

Tab.4 The result of three-point bending tests

序号	抗弯强度 (右/左)	抗弯刚度 (右/左)	取材时间 (术后/周)
4	0.20	0.35	4
3	0.84	1.68	
5	0.68	.95	
6	0.81	1.01	
7*	0.43	0.79	
10	0.71	1.40	8
11	0.68	0.62	
12*	0.44	0.92	
2	1.13	1.20	
8	0.89	1.02	18
9	0.79	1.13	

注:* 在表 1 中 X 线表现 3 周数值出现异常减小, 表 2 中显示拆除固定时间为 6 周

本文得到的等效最弱抗弯截面只是分别从正位和侧位投影面得出的二维折曲面。与实际骨折断端的三维的最弱界面不同。但是, 这种等效反映了愈

合骨结构的最弱特征。在本文8周取材的实验标本骨折愈合骨3点弯测试中,肉眼观察其实际再骨折破坏的断面与图1(b)箭头所示代表的等效最弱抗弯截面相似。骨折愈合首先发生的是骨痂弥合,使骨折断裂造成的强度间隙消失,减小应力集中,并快速恢复原有刚度和大部分强度。之后这些填充生长并且矿化的骨痂与原始断面的皮质骨一起通过相对缓慢的改建和生长过程恢复骨折前完整结构。因此,在原有X线平片基础上进一步计算分析愈合骨的断裂力学结构特征,弥补了前述文献中对骨痂结构分析的不足。当然,通过X线断层扫描技术可以更加真实地获得三维最弱界面。但是由于价格高昂,X线曝光量剧增,计算处理技术设备要求高,计

表5 最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值平均值与K值平均值相关数据表

Tab.5 The ratio of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia related with K value

项目(12只动物平均值)	第1周	第2周	第3周	第4周
侧位片惯性矩 计算值(最弱/最强)	0.31	0.34	0.43	0.56
正位片惯性矩 计算值(最弱/最强)	0.40	0.47	0.56	0.66
$K/(N \cdot \mu m^{-1})$	0.679	2.115	3.459	4.788

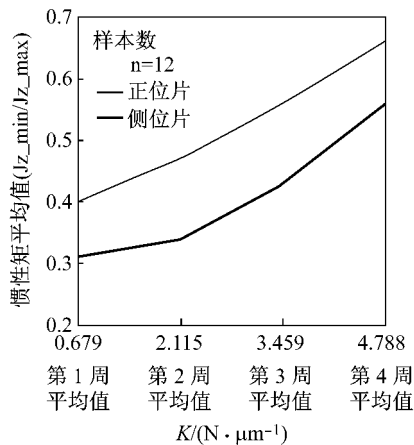


图6 12只家兔最弱抗弯截面惯性矩和最强抗弯截面惯性矩的比值平均值与K值平均值的相关性

Fig.6 The means of ratio of the minimum to the maximum of equivalent bending moments of inertia of the 12 rabbits related with means of K value

算耗时长,实用性受到影响。外骨痂生长有较强规律性,并且在普通正侧位X线平片易于辨认。从骨折近端和远端分别生长的骨痂在愈合进程中逐渐合拢,最终弥合。临床实际骨折类型除了横断型,还有螺旋型、斜型、粉碎型、压缩嵌插型等多种类型,情况相对复杂。本文所述方法虽然仅针对横型骨折线,但由于考虑骨折愈合的关键问题是断端的有效联接,给出等效最弱截面,较好地反映了实际读片感觉。

从表1中数据可看到少数个体(如4号、7号和12号)的最弱抗弯截面惯性矩与最强抗弯截面惯性矩的比值未按图4统计平均趋势变化。虽然这可能与X线平片对空间信息分辨能力受局限有关,但同样8周取材的7只动物中,7号和12号2只家兔愈合骨抗弯强度与其他5只有较大差别,如表4所示。而在表3中也可看到,7号和12号家兔K值增加缓慢,也显示愈合进程受到一定影响(原因可能是2~3周时期家兔活动增大,而断端处于相变关键期,愈合易受外界饲养环境影响,例如固定装置与饲养笼孔隙的机械卡拉)。尽管不够统计例数,也从反面说明,本文所述等效最弱截面X线变化规律能比较灵敏地反映骨折骨强度恢复的进程,值得进一步深入研究。

从X线片计算得到的最弱抗弯截面惯性矩和最强抗弯截面惯性矩的比值与在体抗弯刚性测试所得K值之间具有很好的相关性。如表5所示,考虑1~4周愈合过程,侧位片惯性矩计算值(最弱/最强)平均值与K值平均值有相关性,Pearson's 双侧检验相关系数0.924, $P < 0.05$,有显著意义;正位片惯性矩计算值(最弱/最强)平均值与K值平均值有相关性,Pearson's 双侧检验相关系数0.991, $P < 0.01$,有极显著意义。

本文数据还表明,对于家兔个体,这种相关性也存在。12只家兔分别按个体对1~4周进行相关性统计,侧位片惯性矩计算值(最弱/最强)与K值相关系数(剔除4号、7号和12号样本后,剩余9只家兔)合并^[11]后为0.744;个体正位片惯性矩计算值(最弱/最强)与K值的相关系数(剔除7号和12号后剩余10只家兔)合并后为0.784。个体差别导致本文所得结果平均值的标准差较大。通过进一步研究,将个体自身相关的影像力学分析参数与功能

测试数据^[12](例如下肢无痛负重值)有机结合起来,可以有效排除个体间误差,对于判断个体骨折愈合拆除固定时机等临床个体化治疗关键环节有重要的指导作用。

参考文献:

- [1] 曾更生. 医学图像重建 [M]. 北京:高等教育出版社,2010:1-192.
- [2] 李宗生,王洪生. 儿童髌部和股骨的 CT 低剂量扫描 [J]. 浙江临床医学,2009,11(2):198-199.
- [3] 洪明飞,陶锡东,顾湘杰. 成人胫腓骨骨折 130 例治疗分析 [J]. 中医正骨,2000,12(4):13-14.
- [4] 钱民全,陶祖莱,盛家宁,等. 骨折愈合与应力的适应性假设——兼论小夹板固定的优越性 [J],北京生物医学工程,1984(1):28-32.
- [5] 邹炳曾,董福慧,钱民全,等. 骨折愈合过程中骨痂力学强度与骨痂灰度相关性研究 [J],中国中西医结合杂志,1997,10(11):663-665.
- [6] 董福慧. 小夹板固定治疗骨折生物力学研究 [D]. 中国中医研究院骨伤科研究所博士论文,1987:47-67.
- [7] 钟红刚,赵宏普,宋跃,等. 穿针滑动固定家兔胫骨实验性骨折愈合过程断端位移测试 [J] 中国骨伤,2001,14(10):604-605.
- [8] 钟红刚. 骨的三点弯测试与裂纹尖端分子拉伸的计算机模拟 [D]. 北京工业大学博士学位论文,2008:36-38.
- [9] 钟红刚,卜海滨,董福慧. X 线灰度与骨质厚度相关关系测试 [J]. 中国骨伤,2008,21(3):194-195.
- [10] 钟红刚,刘卫华,卜海滨,等. 家兔胫骨三点弯测试 [J]. 中国骨伤,2008,21(2):103-105.
- [11] 郭祖超. 医用数理统计方法 [M]. 北京:人民卫生出版社,1988:215.
- [12] 钟红刚,张兴平,金阳,等. 骨折复位固定器疗法定量问题探讨 [J]. 医用生物力学,2001,16(3):147-149.
Zhong HG, Zhang XP, Jin Y, et al. Researches on the quantification of fracture treatment method with reduction fixation [J]. J Med Biomech, 2001, 16(3):147-149.

(上接第 136 页)

- [7] 李霞,董翔,刘希强,等. 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震集中区震源机制变化过程 [J]. 西北地震学报,2010,32(3):231-236.
- [8] 谢志勇,许世雄,李信安,等. 关于中医推拿手法摆动类揉法施力的频域分析 [J]. 医用生物力学,1996,11(4):208-211.
Xie ZY, Xu SX, Li XA, et al. Frequency-domain analysis into rolling manipulation mechanics of traditional Chinese medical massage [J]. J Med Biomech, 1996, 11(4):208-211.
- [9] 吕杰,曹金凤,方磊,等. 一种评价近似周期信号相似度的新方法及其对中医揉法均匀性的分析 [J]. 上海中医药大学学报,2010,24(6):54-57.
- [10] 周信文,许世雄,谢志勇,等. 中医推拿手法测力分析仪 FZ-1 型的研制及揉法合力作用点轨迹分析 [J]. 医用生物力学,1996,11(3):179-183.
Zhou XW, Xu SX, Xie ZY, et al. Traditional Chinese medical massage manipulation monitor and analysis of resultant acting point locus [J]. J Med Biomech, 1996, 11(3):179-183.