

骨折愈合过程中骨痂力学强度与骨痂灰度相关性研究*

邹炳曾¹ 董福慧¹ 钱民全² 尚天裕¹ 梁 朝¹ 王 溯¹

内容提要 目的:为建立一种客观无损伤的骨折愈合评估方法。方法:用计算机图像处理方法,对 48 例成人新鲜骨干骨折、50 例成人陈旧骨干骨折、70 只家兔实验性胫骨骨折的 X 线片进行分析。结果:骨痂力学强度与骨痂 X 线灰度呈指数相关($P < 0.05$),骨痂 X 线灰度随骨折愈合的进程而增高。结论:骨力学强度特性与骨痂 X 线灰度密切相关,为中西医结合治疗骨折提供了一个客观的新的疗效评估方法。

关键词 骨痂灰度 骨痂力学强度 骨折愈合评估

Correlative Study between Character of Bending Strength of Callus and X-Ray Density of Callus in Fracture Healing Process ZOU Bing-zeng, DONG Fu-hui, QIAN Min-quan, et al *Institute of Orthopedics and Traumatology, China Academy of TCM, Beijing(100700)*

Objective: To set up an objective and non-injury method to estimate the fracture healing process. **Methods:** X-ray films of 48 cases of adult fresh fracture, 50 cases of adult old fracture and 70 rabbits experimental fracture of tibia were analysed, through computer image processing. **Results:** The bending strength of callus and the X-ray density of callus have an exponential correlation($P < 0.05$). The X-ray density of callus increased coincidently with the fracture healing process. It also confirmed that there was a high correlation between the character of bending strength of callus and the X-ray density of callus. **Conclusion:** It provided an objective method to assess fracture healing treated by the integration of TCM and WM.

Key words X-ray gray extent of callus, bending strength of callus, assessment of fracture healing

骨折愈合的关键是建立骨折端间的完整骨桥,桥梁骨痂必须恢复到足够结构强度去承担肢体负重载荷。骨痂形成的骨折愈合由于有效增加了骨外径和惯性矩,使骨有最大的负重能力,加快了骨痂力学特性的恢复。骨痂体积和骨灰含量在骨折愈合的力学强度中起显著作用⁽¹⁾。本研究试图通过骨痂力学强度与骨痂灰度相关性研究,以期建立一种客观无损伤性的骨折愈合评估方法。

临 床 研 究

1 临床资料

1.1 新鲜骨干骨折 48 例患者,男 29 例,女 19 例;年龄 10~75 岁,平均 37.58 岁。胫腓骨骨干骨折 35 例,股骨干骨折 9 例,肱骨干骨折 4 例。骨折类型:

横断型 6 例,螺旋型 9 例,斜形 9 例,粉碎型 24 例。其中开放骨折 3 例,闭合骨折 45 例。病程 24~125 天,平均 76.7 天。

1.2 陈旧骨干骨折 50 例患者,男 32 例,女 18 例;年龄 11~67 岁,平均 42.7 岁。胫腓骨骨干骨折 23 例,股骨干骨折 8 例,肱骨干骨折 7 例,尺骨干骨折 9 例,桡骨干骨折 3 例。骨折类型:横断 8 例,螺旋 11 例,斜形 13 例,粉碎 18 例。病程 6~57 个月,平均 16.93 个月。其中延迟愈合 12 例,不愈合 38 例。

2 治疗方法

2.1 新鲜骨干骨折酌情使用局部夹板固定或穿针外固定器固定,其中夹板固定 24 例,穿针外固定器固定 24 例。

2.2 陈旧骨干骨折中夹板固定 33 例,穿针外固定器固定 17 例。骨折端局部注射骨折愈合刺激素金葡液(主要成分为蛋白质、多肽、十八种氨基酸、游离凝固酶,杭州第一生物化学制药厂生产,批号 940518),以促进骨痂形成。每周 1 次,每次 2ml,1 个月为 1 个

* 国家自然科学基金资助课题 (No.19272068)

1. 中国中医研究院骨伤科研究所(北京 100700); 2. 中国科学院力学研究所

疗程,治疗 3 个疗程。

3 骨痂灰度图像测量 新鲜骨折每例患者选择治疗前、治疗中期(平均伤后 35 天)、骨折愈合时 3 张 X 线片;陈旧骨折选择治疗前、治疗后 4 周、8 周、12 周 4 张 X 线(患侧与健侧均位于同一 X 线片上),用计算机图像处理系统(北京仁和电子有限公司 IMA-3200 图像处理系统,分辨率 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$)测量分析骨折端和对侧正常骨干的灰度分布。测量比例 $10\text{mm} = 198$ 像素(扫描点),灰度级 32 级,测量矩形框大小为 X 轴 250 像素, Y 轴 230 像素。

4 结果

4.1 骨折愈合情况 临床愈合标准按 1975 年中西医结合治疗骨折学术座谈会议的“骨折愈合试行标准”^[2],新鲜骨折中 47 例患者在 24~125 天达到临床愈合,平均 76.76 天(11 周),1 例开放性骨折因伤口感染致骨折延迟愈合,治疗 297 天(42 周)而达临床愈合。陈旧骨折经 3 个月治疗后,50 例中愈合 26 例占 52%,显效 13 例占 26%,有效 6 例占 12%,无效 5 例占 10%。

4.2 骨痂灰度分析 为校正因拍 X 线片时各种参数误差的影响,分析时采用自身对照 X 线灰度率(%),即骨折部位平均灰度值/正常骨干区域平均灰度值。新鲜骨干骨折 X 线灰度率治疗前为 94.30 ± 19.79 ,治疗中期为 99.92 ± 16.97 ,骨折愈合时为 107.51 ± 19.74 。陈旧性骨干骨折 X 线灰度率治疗前 103.05 ± 19.91 ,治疗 4 周为 109.54 ± 17.48 ,治疗 8 周时为 117.47 ± 15.84 ,治疗 12 周时为 115.47 ± 13.11 。方差分析表明骨折愈合不同阶段有显著性差异($P < 0.05$)。以上结果表明,随骨痂形成增加和骨折愈合进程的推移,骨痂灰度逐渐增加。

实验研究

1 材料和方法

1.1 动物模型的建立 健康成年大耳白家兔 70

附表 兔胫骨骨干骨折不同时期 X 线灰度率、骨痂强度率与骨痂钙磷含量比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	兔数	骨折时间 (周)	X 线灰度率 (%)	骨痂强度率	骨痂钙含量 (能谱点/ nm^2)	骨痂磷含量
对照	10	0	82.76 ± 10.40	—	—	—
1	10	2	113.15 ± 18.64	17.38 ± 5.29	168.23 ± 88.78	122.96 ± 49.13
2	10	3	127.66 ± 12.89	76.21 ± 35.50	657.21 ± 84.47	365.01 ± 78.30
3	10	4	126.71 ± 13.34	78.55 ± 31.84	453.75 ± 178.97	253.64 ± 113.07
4	10	5	125.81 ± 9.93	64.82 ± 18.87	199.55 ± 40.50	112.97 ± 22.86
5	10	6	126.62 ± 19.34	50.88 ± 13.24	219.57 ± 89.05	134.22 ± 43.44
6	10	7	115.40 ± 26.81	43.73 ± 22.80	229.58 ± 140.08	136.79 ± 81.98
7	10	8	126.46 ± 17.31	43.74 ± 26.08	265.59 ± 149.25	170.23 ± 108.42

只,雌雄各半(由中国中医研究院动物中心提供),月龄为 10 个月,体重 2.1~3.5kg,平均 2.7kg;颗粒型标准饲料喂养。3%戊巴比妥钠 1ml/kg 耳后静脉麻醉。右下肢剪毛,常规无菌手术操作,在胫骨结节上 0.5cm 和内踝上 1.5cm 处各用直径 1mm 克氏针穿过骨皮质备用。在 WD-1 型电子万能试验机(长春试验机厂制造)上闭合折断右胫骨中段,造成横断骨折,三点弯曲加载方式,加载速度 100mm/min,支点距离 60mm,内外两块塑料夹板固定,将针的两端分别穿过两侧夹板的远近端孔,针尾剪短弯曲,胶布上下捆绑夹板固定。术后 1 周内每天观察伤肢肿胀情况,调整夹板松紧度。将实验动物随机于手术后 2 周、3 周、4 周、5 周、6 周、7 周及 8 周处死,共分 7 组,每组 10 只动物。

1.2 骨痂灰度图像分析 实验动物造成闭合骨折和处死后即行拍摄双下肢前后位 X 线片,每次拍片用确定拍摄参数,即管球至标本距离 100cm,管电压 45kV,管电流 100mA,曝光时间 0.12s。所获得标准 X 线片用计算机图像处理系统测量分析胫骨骨折端和对侧完整胫骨的灰度分析,测量比例 $10\text{mm} = 198$ 像素,灰度级 32 级,测量矩形框 X 轴 210 像素, Y 轴 230 像素。

1.3 骨折愈合力学强度测试 动物处死后剔除组织,保留骨膜,取出完整双侧胫骨标本。将标本置于 WD-1 型电子万能机上行三点弯曲强度试验,加载速度 10mm/min,支点距离 60mm。记录最大抗弯强度值和应力应变曲线。

1.4 骨痂处钙、磷含量测量 将三点弯曲强度试验后的实验侧胫骨标本以生理盐水冲洗,用低速骨锯以骨痂中点为截面制成长 10mm 标本,10%甲醛固定,逐级乙醇脱水,真空临界点干燥喷金,扫描电镜(HITACHI S-570 型)观察,并以与该电镜相匹配的 EDAX-9100 电镜能谱仪测量外骨痂处钙、磷元素含量。

2 结果 兔胫骨骨干骨折不同时期 X 线灰度率、骨痂强度率与骨痂钙磷含量比较:见附表。

兔骨痂灰度率(即骨折端平均灰度值/对侧胫骨平均灰度值),在术后 3 周时迅速增加,为对侧胫骨的 127.66%,而后维持在平台水平,结果见附表。方差分析显示各实验组间有显著性差异($P < 0.01$)。

兔骨痂强度在术后 3 周时迅速恢复,为对侧胫骨的 76.21%,4 周时达最高峰(78.55%),而后维持在 50%左右。方差分析显示各组间有显著性差异($P < 0.01$)。

骨痂强度与骨痂灰度相关性:对骨痂强度与 X 线灰度率作了直线相关分析,显示二者间呈正的直线相关关系,直线表现为指数方程,相关系数 $r = 0.785$, $P < 0.05$; 直线回归方程为:骨痂强度 = $-286.95e^{2.77(\text{骨痂灰度})}$ 。

骨痂钙、磷含量:测试表明骨痂处钙磷含量在骨折 3~4 周时迅速增高,然后趋于下降,至术后 7~8 周时又有所上升。方差分析显示各实验组间有显著性差异($P < 0.01$)。

讨 论

现代生物力学研究表明,骨折端在生理范围内的活动可以加快桥梁骨痂的发生和促进愈合速度,对骨重建有利^[3]。骨折后,随着时间的推移,外骨痂不断为骨折局部提供机械强度和刚度,并通过骨重建使愈合后的骨骼恢复原有的强度和刚度特性。实验表明夹板固定后骨折端有大量外骨痂形成,骨折 2 周时已有骨痂出现,以后逐渐增多,至 4 周时兔胫骨骨折端已由外骨痂桥架。愈合骨三点弯曲力学强度试验显示骨痂弯曲强度在术后 3~4 周时迅速恢复,并达最高峰值。骨力学强度与骨矿物质含量密切相关,骨基质形成后需要骨盐沉积以完成愈合,故骨痂钙磷含量的变化也反映了骨折愈合过程。骨折后 3~4 周时骨痂内钙磷含量迅速增高,骨痂趋于成熟骨化,因而骨痂中钙磷沉积也较多,使骨的力学强度迅速增加,也承担肢体负重载荷。

兔胫骨骨折不同愈合阶段 X 线骨痂灰度在骨折愈合早期快速增长,骨折 3 周时已达最高峰值,4~8 周时骨痂灰度曲线维持在平台水平,与兔胫骨三点弯曲力学强度试验结果相吻合。骨痂弯曲强度与骨痂灰度直线相关分析表明,骨力学强度在 X 线灰度值一个狭窄的范围内迅速增长,用指数相关能更好表达它们的相关关系。说明当骨痂逐渐成熟,胶原纤维排列更

趋于组织化时,羟基磷灰石结晶可迅速增加骨力学强度特性。骨的材料特性与它们所表现的密度有关,相关公式为 $Y = ax^b$ 。骨灰含量与骨力学强度在理论上几乎成直线关系,但可能不是真实的表现,因为在 60% 的骨灰含量时也可能表现为零强度。因此骨的力学强度特性被矿物质化程度所决定,并且这种关系常被描述为非线性^[4]。

骨折愈合过程中,初期骨痂虽钙化不好,强度不足,但提供了较高的惯性矩,以代偿骨的完整性不足,是骨折部位稳定的重要因素。随着骨折愈合,骨痂钙化日趋完善,骨强度也逐渐恢复,外骨痂在功能上与内固定物起着相同的作用。骨干骨折愈合痂灰度图像分析表明,骨痂灰度随着外骨痂逐渐增多和骨折愈合进程而增大。

虽然大多数骨折愈合评估依靠传统方法有较高的准确性和可信性,但仍具有主观性的缺陷,而且基于主观 X 线片分析无法推测骨折的力学特性^[5],因此临床和实验研究中不少学者正致力于寻找一种客观无损伤性技术,以推测骨折愈合情况^[6,7]。实验研究结果表明骨痂强度和骨痂内钙磷含量与骨痂 X 线灰度在骨折愈合过程中的变化密切相关,因此所有临床应用 X 线片判断骨折愈合方法都与骨痂结构强度和刚度的恢复相关联。提示骨痂 X 线灰度图像分析方法作进一步深入研究后,能提供一种客观可靠的非侵入性方法评估骨折愈合的结构强度和局部特性。

参 考 文 献

1. 尚天裕. 尚天裕医学文集. 第 1 版. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 187—191.
2. Markel MD. Formation of bone in tibial defects in a canine model. *J Bone Jt Surg* 1991; 73A: 914—916.
3. Chao YS, Aro HT, Lewallen DG, et al. The effect of rigidity on fracture healing in external fixation. *Clin Orthop* 1989; 241: 24—25.
4. Tiedeman JJ, Lippiello L, Connolly JF, et al. Quantitative roentgenographic densitometry for assessing fracture healing. *Clin Orthop* 1990; 253: 279—281.
5. Nicholls PJ, Berg E, Bliven FE, et al. X-ray diagnosis of healing fracture in rabbits. *Clin Orthop* 1979; 142: 234—236.
6. Markel MD, Chao YS. Noninvasive monitoring techniques for quantitative description of callus mineral content and mechanical properties. *Clin Orthop* 1993; 239: 37—39.
7. Black J, Perdigon P, Brown N, et al. Stiffness and strength of fracture callus. *Clin Orthop* 1984; 182: 278—280.

(收稿: 1996-02-09 修回: 1997-08-01)