

## · 基础研究 ·

## 分米波辐射后肌腱愈合的早期生物力学研究

罗健 田德虎 张英泽 于昆仑 张义龙 赵峰 刘春杰 刘雷

【摘要】目的 探讨分米波辐射后肌腱愈合早期生物力学变化并观察分米波对主动活动运动的影响。方法 选用 Leghorn 鸡 56 只,随机分为治疗组和对照组,每组 28 只。取 Leghorn 鸡左足第Ⅲ、Ⅳ趾为肌腱损伤模型趾。将趾深屈肌腱切断、修复,术后石膏托固定,手术部位暴露。治疗组术后 1 d~3 周局部用分米波辐射治疗,对照组行空白对照。术后 1,7,10,14,18,21,28 d 取材进行生物力学检测,观察 2 组肌腱最大拉伸断裂强度( $P_{\max}$ )、肌腱最大延伸率( $\delta_{\max}$ )、拉断肌腱粘连带功耗( $W_0$ )。结果 治疗组术后 7,10,14,18,21,28 d  $P_{\max}$ 、 $\delta_{\max}$ 、 $W_0$  均明显优于对照组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。结论 分米波能抑制肌腱外源性愈合、促进内源性愈合,增加肌腱弹性变形能力和坚韧程度,缩短水肿期并减轻疼痛,为早期主动运动提供了必要条件。

【关键词】分米波; 肌腱愈合; 粘连; 生物力学,主动运动

**Biomechanical analysis in the early period of flexor tendon healing after decimeter wave therapy** LUO Jian\*, TIAN De-hu, ZHANG Ying-ze, YU Kun-lun, ZHANG Yi-long, ZHAO Feng, LIU Chun-jie, LIU Lei. \* Department of Hand Surgery, The 3rd Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050051, China  
Corresponding author: TIAN De-hu, Email: tiandehu899@sohu.com

【Abstract】Objective To investigate the biomechanical characteristics of flexor profundus tendons repaired after decimeter wave therapy, and to observe the effect of decimeter wave therapy on early active mobilization. Methods A total of 56 Leghorn chickens were randomly divided into a therapy group and a control group with 28 chickens in each. The 3rd and 4th toes of their left feet were employed for the establishment of a tendon injury model. The flexor profundus tendons were cut and repaired. Gypsum support was applied and fixed with an adhesive plaster after the operation. The operated sites on toes III and IV were exposed. The external fixation was removed 3 weeks later and the chickens were left free to move. Decimeter wave therapy (frequency 915 MHz, power 8 Watts) was applied for 10 minutes once daily on the left foot of each chicken in the therapy group from day 1 until 3 weeks after the operation. Sham decimeter wave therapy was applied to chickens in the control group. Four chickens from each group were randomly selected at the 1st, 7th, 10th, 14th, 18th, 21st and 28th days for biomechanical analysis. Biomechanical parameters including tensile strength of rupture ( $P_{\max}$ ), elongation ratio at rupture ( $\delta_{\max}$ ) and the tensile adhesion strength of the rupture zone ( $W_0$ ) were observed at each time point. Results At the 7th, 10th, 14th, 18th, 21st and 28th day after the operation, the differences in  $P_{\max}$ ,  $\delta_{\max}$  and  $W_0$  between the therapy and control groups were statistically significant. The results of the therapy group were better than those of the control group. Conclusions Local decimeter wave therapy after flexor tendon repair can promote intrinsic healing and reduce extrinsic healing. The speed and quality of healing are improved. The elasticity and tenacity of the injured tendons are enhanced. Therefore decimeter wave therapy is helpful for early active mobilization training.

【Key words】Decimeter wave therapy; Tendon healing; Adhesions; Biomechanics; Active mobilization

肌腱损伤修复术后肌腱粘连一直是临床工作中一个非常棘手的问题,也是研究的热点问题。近年来,主动运动对促进肌腱愈合、减轻术后粘连的重要作用逐

渐被研究者重视,期望通过早期主动运动改善受损肌腱修复效果。本研究采用分米波辐射 Leghorn 鸡趾深屈肌腱受损模型,观察肌腱愈合早期,尤其是水肿期生物力学强度及韧性的变化特点,探讨分米波辐射对主动运动的影响,为临床应用提供理论依据。

## 材料与方法

## 一、实验动物与分组

选用 6 个月月龄的健康雄性白色 Leghorn 鸡 56

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2009.05.005

作者单位:066000 秦皇岛,秦皇岛市第一医院手外科(罗健);河北医科大学第三医院手外科(田德虎、张英泽、于昆仑、张义龙、赵峰、刘春杰、刘雷)

通信作者:田德虎,Email: tiandehu899@sohu.com

只,体重( $2.24 \pm 0.07$ ) kg。随机分为治疗组和对照组,每组 28 只。

## 二、方法

选用 Leghorn 鸡双足第Ⅲ、Ⅳ趾制备肌腱损伤模型。常规麻醉、消毒,取足趾近侧指间关节为中心的 Bruner 皮肤切口,于趾间关节伸直位趾浅屈肌腱 Camper 交叉远侧 3 mm、长腿组入腱点近侧锐性横断趾深屈肌腱,以 5-0 无损伤缝合线作改良 Kessler 法腱内缝合,7-0 无损伤缝线作肌腱周边、腱鞘单纯连续缝合。术后踝关节跖屈  $90^\circ$ ,跖趾关节屈曲  $90^\circ$ ,趾间关节伸直位石膏托、胶布固定,第Ⅲ、Ⅳ趾手术部位暴露。术后 3 周末去除外固定自由活动。治疗组于术后 1 d 至术后 3 周俯卧位双腿后伸位足爪跖侧用分米波辐射治疗,频率 915 MHz,功率 8 W,辐射距离 10 cm,每日 1 次,每次 10 min。对照组于治疗组治疗同时以相同体位固定于相同型号实验台,但不行分米波辐射治疗。

## 三、观察指标和检测方法

### (一) 观察指标

观察肌腱最大拉伸断裂强度( $P_{\max}$ ),肌腱最大延伸率( $\delta_{\max}$ )及拉断粘连带功耗( $W_0$ )。

### (二) 检测方法

分别于术后 1、7、10、14、18、21、28 d 自每组动物中随机选择 4 只行生物力学测试。

1. 取材方法:将第Ⅲ趾趾深屈肌腱远端于远侧趾间关节保留远节趾骨,将趾深屈肌腱与其他组织离断,近端于跖趾关节近侧 3 cm 离断第Ⅲ趾趾深屈肌腱。分别将肌腱断端及远节趾骨夹持于生物力学实验机两端夹具上(美国 MTS 公司生产 Tytron-250 生物力学试验机),肌腱受测试长度(两夹具之间距离)为 4 cm,拉伸速度为 20 mm/min,最大负荷为 100 N。牵拉至肌腱自吻合口部断裂,由实验机相连的计算机同步测量得出拉力-位移曲线并记录肌腱  $P_{\max}$ 。

进行上述实验时,根据拉力-位移曲线与实验机相连的计算机同步测量记录肌腱被拉断时的长度,按以下公式计算出  $\delta_{\max}$ 。 $\delta_{\max} = [(肌腱被拉断时的长度 - 肌腱初始长度) / 肌腱初始长度] \times 100\%$ 。

2. 正常肌腱屈曲滑动距离的测定:取健侧第Ⅳ趾 8 个,将近节趾骨固定而不影响第Ⅳ趾的屈曲。将第Ⅳ趾完全伸直,同一水平鞘管壁和肌腱上都分别保留有缝线作为定点标记,沿肌腱长轴牵拉肌腱使其逐渐屈曲至趾尖触及近节皮肤。通过测量尺测量此刻肌腱标记点与鞘管标记点的距离,此距离定义为肌腱屈曲的滑动距离(M)。经测量 M 为 15.0 ~ 15.3 mm(平均 15.2 mm)。根据这一结果,我们设定本研究实验鸡的第Ⅳ趾屈曲滑动的距离 M 值为 15 mm。

3.  $W_0$  测定:从跖趾关节离断第Ⅳ趾,将第Ⅳ趾的

趾深屈肌腱在跖趾关节以近 3 cm 切断。以环形夹具固定标本近节趾骨而不影响趾间关节运动。将趾深屈肌腱近端固定在另一端夹具上,并使肌腱全长处于同一直线。拉伸速度为 20 mm/min,最大负荷为 100 N。每个标本测试 2 次,第 1 次当肌腱近端滑动 15 mm 后停止,获得第 1 次 15 mm 拉力-位移曲线,曲线下面积表示第 1 次拉伸 15 mm 的功耗( $W_1$ ),与实验机相连的计算机同步测量读取  $W_1$ 。将标本恢复原状,再次拉伸肌腱近端滑动 15 mm,获得第 2 次的拉力-位移曲线,曲线下面积表示第 2 次拉伸 15 mm 的功耗( $W_2$ ),与实验机相连的计算机同步测量读取  $W_2$ 。按以下公式计算: $W_0 = W_1 - W_2$ 。

## 四、统计学分析

所有数据均采用 SPSS 11.0 版统计软件包进行统计学处理。各生物力学数据以( $\bar{x} \pm s$ )表示,统计学分析采用方差分析,同一时间点 2 组间的比较选用独立样本  $t$  检验。

## 结 果

### 一、肌腱最大拉伸断裂强度

术后第 1 天,2 组的肌腱  $P_{\max}$  差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),术后第 7、10、14、18、21、28 天,2 组的肌腱  $P_{\max}$  差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),见表 1。

表 1 2 组不同时间点的  $P_{\max}$ 、 $\delta_{\max}$  及  $W_0$  的比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 组 别     | $P_{\max}$ (N)     | $\delta_{\max}$ (%) | $W_0$ (mJ)         |
|---------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 治疗组     |                    |                     |                    |
| 术后 1 d  | $43.57 \pm 6.37$   | $22.45 \pm 3.75$    | $8.11 \pm 1.94$    |
| 术后 7 d  | $41.11 \pm 5.20^a$ | $21.36 \pm 3.41^a$  | $16.59 \pm 2.85^a$ |
| 术后 10 d | $35.06 \pm 4.19^a$ | $21.06 \pm 2.80^a$  | $20.04 \pm 3.27^a$ |
| 术后 14 d | $29.85 \pm 3.15^a$ | $16.95 \pm 2.20^a$  | $24.15 \pm 2.18^a$ |
| 术后 18 d | $37.79 \pm 3.35^a$ | $17.33 \pm 2.04^a$  | $23.52 \pm 2.63^a$ |
| 术后 21 d | $44.87 \pm 4.52^a$ | $21.87 \pm 2.60^a$  | $24.46 \pm 2.78^a$ |
| 术后 28 d | $58.42 \pm 6.05^a$ | $22.64 \pm 2.55^a$  | $23.65 \pm 3.16^a$ |
| 对照组     |                    |                     |                    |
| 术后 1 d  | $42.80 \pm 7.22$   | $24.29 \pm 3.75$    | $7.97 \pm 1.63$    |
| 术后 7 d  | $32.16 \pm 4.30$   | $16.67 \pm 2.10$    | $22.89 \pm 2.70$   |
| 术后 10 d | $26.37 \pm 4.76$   | $15.26 \pm 2.54$    | $26.75 \pm 3.00$   |
| 术后 14 d | $20.10 \pm 3.27$   | $12.85 \pm 2.00$    | $29.50 \pm 2.35$   |
| 术后 18 d | $26.02 \pm 3.10$   | $11.60 \pm 1.29$    | $32.60 \pm 2.81$   |
| 术后 21 d | $36.05 \pm 4.31$   | $12.25 \pm 1.40$    | $33.75 \pm 2.51$   |
| 术后 28 d | $48.50 \pm 5.20$   | $16.40 \pm 2.31$    | $35.50 \pm 3.29$   |

注:与对照组同时时间点比较, $^a P < 0.05$

### 二、肌腱最大延伸率

术后第 1 天,2 组的肌腱  $\delta_{\max}$  差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),术后第 7、10、14、18、21 及 28 天时,2 组的肌腱  $\delta_{\max}$  差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),见表 1。

### 三、拉断肌腱粘连带功耗

术后第 1 天,2 组  $W_0$  差异无统计学意义( $P >$

0.05), 术后第 7, 10, 14, 18, 21 及 28 天时, 2 组  $W_0$  差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 见表 1。

## 讨 论

肌腱愈合过程中内源性愈合和外源性愈合总是并存的, 促进内源性愈合与减少外源性愈合是解决肌腱粘连问题所努力的方向<sup>[1]</sup>。术后早期保护性活动可促进肌腱愈合和防止肌腱粘连已得到公认。自 20 世纪 90 年代开始, 人们把更多的注意力转向在牢固缝合的基础上早期开始主动活动以提高疗效, 预防肌腱粘连<sup>[2,3]</sup>。临床上多通过改良肌腱缝合方法和缝线材料以增强肌腱牢固性, 为早期功能训练提供有力保证<sup>[4,5]</sup>。

术后早期主动运动导致肌腱再断的发生和局部疼痛加剧是影响早期功能训练的主要因素<sup>[6]</sup>。肌腱愈合过程的坚韧程度和弹性变形能力直接决定了早期主动运动的可行性。本实验以  $P_{max}$  反映肌腱坚强程度,  $\delta_{max}$  反映肌腱弹性变形能力, 作为评价肌腱修复后生物力学变化的指标。经生物力学检测发现, 治疗组术后 7, 10, 14, 18, 21, 28 d 的  $P_{max}$ 、 $\delta_{max}$  均优于对照组, 说明分米波辐射治疗使肌腱抗拉力及变形能力均增强。推测其机制为: ①增加肌腱的血液循环, 加强肌腱的营养, 促进肌腱内、外膜及肌腱细胞的生长, 进而促进内源性愈合; ②中晚期行分米波治疗, 促使胶原纤维按照肌腱的应力方向有规律地重新排列, 增加胶原组织的伸展性, 减轻肌腱的粘连; ③促进滑液分泌, 改善肌腱营养和滑动功能<sup>[7]</sup>。

多数学者认为, 肌腱损伤修复后持续近 2 周的水肿期对肌腱的生物力学特性有很大影响<sup>[8,9]</sup>。本实验 2 组  $P_{max}$ 、 $\delta_{max}$  在术后 10~14 d 均显著降低, 治疗组在术后 18 d 明显恢复, 到术后 21 d 完全恢复至术后 1 d 水平, 而对照组从术后 10 d 以后持续性降低, 在术后 21 d 两个指标都低于术后 1 d 水平。说明分米波辐射治疗在促进肌腱内源性愈合同时能够缩短肌腱愈合的软化期, 增强软化期内的肌腱强度, 减少肌腱再断裂的可能, 为早期功能训练提供了理论支持。

拉断肌腱的  $W_0$  反映了肌腱与周围组织的粘连情况, 粘连越多越坚韧, 拉断肌腱粘连带功耗越大, 主动运动做功越多; 粘连越少越质软, 拉断肌腱  $W_0$  越小, 主动运动做功越少。本实验检测发现, 除术后第 1 天粘连带尚未形成, 2 组差异无统计学意义外, 治疗组术后第 7, 10, 14, 18, 21, 28 天  $W_0$  均小于对照组。推测由于分米波辐射减轻了肌腱损伤引发的炎性渗出, 加

快血肿的吸收, 从而减少了损伤后炎性反应及血肿机化所致粘连的形成, 抑制肌腱外源性愈合, 使粘连带减少且质软, 所以拉断肌腱  $W_0$  低<sup>[10]</sup>。

分米波治疗促进肌腱的内源性愈合, 增加肌腱的柔韧性和抗张强度, 保证了早期主动功能训练。早期主动功能训练又可进一步促进肌腱的内源性愈合, 有效地减少外源性愈合机制, 防治肌腱粘连的形成<sup>[2]</sup>。同时, 分米波治疗可直接减少肌腱的外源性愈合, 减少肌腱粘连, 增加肌腱的滑动性, 从而增加功能训练的有效性, 增大的应力对腱外膜细胞的刺激, 进一步促进肌腱的内源性愈合, 其作用互为因果, 相辅相成。另外, 分米波通过温觉冲动干扰痛觉冲动的传导; 加强局部血液循环, 改善局部的氧供给, 消除局部缺血所致的疼痛; 改善炎性病灶中的血运, 减轻水肿和组织压力, 消除致痛化学介质, 纠正酸碱平衡, 从而达到止痛效果, 也为早期主动功能训练提供了必要条件。

## 参 考 文 献

- [1] Masuda K, Ishii S, Ito K, et al. Biochemical analysis of collagen in adhesive tissues formed after digital flexor tendon injuries. *J Orthop Sci*, 2002, 7: 665-671.
- [2] Dubert T. Current techniques for primary flexor tendon repair. *Chir Main*, 2002, 21: 218-224.
- [3] Grewal R, Chan Saw SS, Varitimidis S, et al. Evaluation of passive and active rehabilitation and of tendon repair for partial tendon lacerations after three weeks of healing in canines. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2006, 21: 804-809.
- [4] Gudemez E, Eksioglu F, Korkusuz P, et al. Chondroitin sulfate-coated polyhydroxyethyl methacrylate membrane prevents adhesion in full-thickness tendon tears of rabbits. *J Hand Surg*, 2002, 27: 293-306.
- [5] Atik B, Tan O, Dogan A, et al. A new method in tendon repair: angular technique of interlocking (ATIK). *Ann Plast Surg*, 2008, 60: 251-253.
- [6] Tang JB. Clinical outcomes associated with flexor tendon repair. *Hand Clin*, 2005, 21: 199-210.
- [7] 田德虎, 郭明珂, 米立新, 等. 分米波防治屈肌腱粘连机制的实验研究. *中华物理医学与康复杂志*, 2003, 25: 646-649.
- [8] Ion LE, Sykes PJ, Cassell OC, et al. Comparative biomechanical analysis of a new circumferential flexor tendon repair and a modified Kessler repair. *J Plast Surg*, 1997, 50: 236-241.
- [9] Coppolino S, Lupo F, Quatra F, et al. Surgery and rehabilitation of flexor tendons injuries in zone 1 and 2. *Minerva Chir*, 2003, 58: 93-96.
- [10] 米立新, 马全胜, 田德虎, 等. 分米波防治屈肌腱粘连的生物学特征. *中国临床康复*, 2006, 10: 132-133.

(修回日期: 2009-02-24)

(本文编辑: 松 明)