

文章编号:1004-7220(2014)04-0370-07

# 外置式人工关节控制下的家兔膝关节再生与功能恢复

钟红刚<sup>1</sup>, 张万强<sup>1</sup>, 关继超<sup>1</sup>, 卜海滨<sup>1</sup>, 董福慧<sup>1</sup>, 钱民全<sup>2</sup>, 孟和<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** **目的** 探讨仿生运动生物力学环境下关节再生的可能性。**方法** 采用实验家兔7只,在实验家兔一侧股骨干和胫骨骨干各穿2枚直径1.5 mm克氏针,分别安装框架平台。然后在体外通过在膝关节内、外侧分别安装模拟膝关节矢状面运动轨迹的平面四杆机构,连接股骨和胫骨上已经安装好的框架平台。在股骨髁和胫骨平台同时截骨去除关节软骨、部分软骨下骨及交叉韧带和半月板等结构,但不损伤肌腱起止点,保留关节囊及囊外韧带,保留髌骨和籽骨。术后家兔自然活动。在关节截骨后的愈合过程中定期拍摄X线片,测量关节矢状面的活动度和骨性间隙。**结果** 7只实验家兔中6例成功安装外置式人工关节,截骨微创骨穿针仿生运动外置式人工关节控制下自然活动。膝关节被动活动范围分别为:术后第1周,极限屈曲位( $144.7 \pm 15.62$ )°, 极限伸直位( $44.2 \pm 25.77$ )°, 活动度( $100.5 \pm 29.03$ )°; 术后第12周,极限屈曲位( $139.4 \pm 12.92$ )°, 极限伸直位( $40.4 \pm 22.04$ )°, 活动度( $99.0 \pm 23.39$ )°。截骨术后第12周与截骨术后第1周相比,屈曲位、伸直位和活动度均没有显著差异。X线显示骨性关节间隙依然存在。截骨侧骨性关节间隙明显减小,由截骨术后第1周( $4.03 \pm 1.84$ ) mm减小到第12周( $2.32 \pm 1.05$ ) mm,而对侧正常骨性关节间隙为( $1.27 \pm 0.22$ ) mm。术后16周拆除外置式人工关节,切开关节囊观察,发现新生白色软骨覆盖截骨再生表面,表面光滑,具有典型关节滑车结构,并且观察到类似韧带的纤维束从再生的股骨下端发出,终止于新生的胫骨上端。术后第25周,所有6只实验家兔截骨再生膝关节屈曲位( $148.3 \pm 4.75$ )°, 伸直位( $48.30 \pm 17.57$ )°, 活动范围( $100.0 \pm 20.80$ )°; 对侧(左侧)正常膝关节屈曲位( $148.3 \pm 7.5$ )°, 伸直位( $21.6 \pm 9.09$ )°, 活动范围( $126.7 \pm 6.88$ )°。截骨侧、对侧骨性关节间隙分别为( $1.4 \pm 0.59$ )、( $0.92 \pm 0.35$ ) mm。**结论** 外置式仿生运动人工关节为家兔膝关节再生保留了再生空间,提供了一种运动模拟环境、印证了骨折愈合过程的应力适应性。本研究结果提示仿生运动生物力学环境下,正常家兔膝关节内截骨后再生是可能的。

**关键词:** 膝关节; 再生; 外置式人工关节; 骨折愈合; 应力适应性

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

## Regeneration and functional recovery of rabbit knee joint after osteotomy under control of external artificial joint

ZHONG Hong-gang<sup>1</sup>, ZHANG Wan-qiang<sup>1</sup>, GUAN Ji-chao<sup>1</sup>, BU Hai-bin<sup>1</sup>,  
DONG Fu-hui<sup>1</sup>, QIAN Min-quan<sup>2</sup>, MENG He<sup>1</sup> (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*)

**Abstract:** **Objective** To discuss the possibility for regeneration of knee joint with normal function under bionics biomechanical environment. **Methods** Seven normal rabbits with two metal frames respectively mounted on their femur and tibia of single (right) side leg by two threading pins of 1.5 mm diameter were used. Then the external artificial joints, containing two four-bar-linkage inside and outside of the knee to simulate motion trajectory of the

收稿日期:2013-09-26; 修回日期:2013-12-12

基金项目:科技部公益项目(DIB1J165),北京市自然科学基金项目(7072050),中国中医科学院名医名家传承项目(CM20121012)。

通信作者:钟红刚,副研究员, E-mail:greatgun\_2202@hotmail.com。

joint in sagittal plane were connected with the two preset fixed frames before osteotomy. The arthro-cartilage of the knee joint, crucial ligaments, semi-lunar fibro-cartilages, and partial under-cartilage-osseous intra articular capsule were cut off during osteotomy, with the patella, sesamoid bones remained intact. Insertion sites of muscle tendons were not invaded as far as possible, and capsules with ligaments outside were kept complete when the incision wound was closed by suture. The rabbits could move freely after osteotomy. The range of motion (ROM) of the knees in sagittal plane and bony gap between the femur and tibia were measured by X-Ray films during the fracture healing after osteotomy. **Results** External artificial knee joints were successfully installed on right legs of 6 rabbits among the seven. The rabbits moved freely after osteotomy under the control of minimal invasive external artificial joint in bionics trajectory. The average angles between femoral shaft and tibial shaft at the 1st week after osteotomy were from  $(144.7 \pm 15.62)^\circ$  in extremely flexed position to  $(44.2 \pm 25.77)^\circ$  in extremely extended position, with ROM of  $(100.5 \pm 29.03)^\circ$ . At the 12th week, the average angles were from  $(139.4 \pm 12.92)^\circ$  in extremely flexed position to  $(40.4 \pm 22.04)^\circ$  in extremely extended position, with ROM of  $(99.0 \pm 23.39)^\circ$ . No significant differences were displayed in flexed/extended position and ROM between the 1st and 12th week, with the bony gaps of the knees still existed but decreased significantly from  $(4.03 \pm 1.84)$  mm at the 1st week to  $(2.32 \pm 1.05)$  mm at the 12th week. In contrast, bony gaps of the opposite knees were not changed significantly, which were  $(1.27 \pm 0.22)$  mm on average. At the end of 16th week after osteotomy, the external artificial joints were removed. Newly born cartilage, with white color and smooth surface, were covered at lower end of the femur and upper end of the tibia. Typical trochlear surface appeared at the front side of regenerated cartilage corresponding to the posterior surface of the patella. And the regenerated fibro-bundle linkage similar with ligament, which started from bony structure of regenerated lower end of the femur and inserted into regenerated upper end of the tibia, was observed in each rabbit. At the 25th week, the average angles between femoral shaft and tibial shaft were from  $(148.3 \pm 4.75)^\circ$  in extremely flexed position to  $(48.30 \pm 17.57)^\circ$  in extremely extended position, with ROM of  $(100.0 \pm 20.80)^\circ$ . In the opposite (left) leg, the average angles between femoral shaft and tibial shaft were from  $(148.3 \pm 7.5)^\circ$  in extremely flexed position to  $(21.6 \pm 9.09)^\circ$  in extremely extended position, with ROM of  $(126.7 \pm 6.88)^\circ$ , and the average bony gap of the knees after osteotomy was  $(1.4 \pm 0.59)$  mm, while that of the opposite (left) knees was  $(0.92 \pm 0.35)$  mm. **Conclusions** The external artificial joint with bionics trajectory could reserve the space for regeneration of rabbit knee joint by providing motion modeling environment, and proved the stress adaption during fracture healing. The present results indicated that regeneration of the knee joint after intra-capsular osteotomy in bionics biomechanical environment was possible.

**Key words:** Knee joint; Regeneration; External artificial joint; Fracture healing; Stress adaption

相关研究证明,力学因素对骨和关节软骨修复与再生有一定作用。1966年,曲绵域<sup>[1]</sup>小组通过家兔髌骨易位压迫导致异位关节软骨形成研究了机械因素对关节软骨修复与再生影响。1984年,钱民全等<sup>[2]</sup>提出骨折愈合过程的应力适应性假设,认为存在一个促进骨折愈合的最佳应力作用形式和范围,在适当固定条件下,通过适当的功能活动在骨折断端可以产生这样的最佳应力作用。

以往研究中一般认为,再生的关节结构只是假关节。1995年,寿柏泉等<sup>[3]</sup>在实验家兔股骨干进行假关节成形术,截断股骨干后断端填充聚四氟乙烯薄膜,结果发现有薄膜间隔的一组股骨干截骨处形成活动度良好的假关节;对照组股骨干截骨处无隔膜则已形成骨性粘连。另一种研究思路则主要关注关节软骨细胞的再生。2004年,魏杰等<sup>[4]</sup>在动物犬双侧股骨髌部造成  $10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  面积全层软骨缺损后,右侧安装关节撑开运动器,左侧对照,自由活

动;20~24周后双侧关节活动自如,透射电镜观测发现实验侧多为较成熟的透明样软骨细胞,而对侧多为大量纤维组织。但是目前尚未见将家兔膝关节截除后通过外置式人工关节支撑获得膝关节再生和功能恢复的报道。

本文基于骨折愈合应力适应性理论及以往相关实验研究和临床实践,将股骨和胫骨在膝关节囊内的骨质、附着的软骨以及相关连接韧带通过截骨去除,视为特殊的骨折愈合过程;辅以允许关节仿生运动的外置式人工关节支撑;监测关节运动功能的恢复过程,同时观察在模仿关节运动的力学环境下是否能再生出与之相适应的骨与关节结构。

## 1 材料与方 法

### 1.1 外置式人工膝关节

采用四杆机构运动模型<sup>[5]</sup>。平面四杆连杆机构由4根杆件通过单自由度铰链联结成一套运动系

统,通过调整四杆的相对长度,实现不同个体膝关节矢状面的运动规律(见图1)。

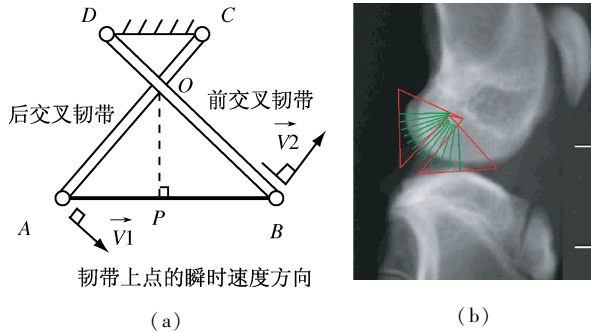


图1 四杆机构膝关节矢状面运动模型(a)和兔股骨髁轮廓计算机模拟(b)

Fig.1 Four-bar-linkage model of the knee moving in sagittal plane (a) and computer simulated outline of the femur condyle (b)

膝关节内的前交叉韧带和后交叉韧带将胫骨和股骨连结起来。图1(a)为四杆机构矢状面投影。其中AB连接臂与胫骨固定并与胫骨平台位置配准,CD连接臂与股骨固定并与股骨髁间窝交叉韧带2个起点连线配准;这2个连接臂由亚克力(有机玻璃)材料加工而成,其长度通过连接臂上的滑槽调节。BD为前交叉杆,与前交叉韧带配准,AC为后交叉杆,与后交叉韧带配准;这2根交叉杆用直径1.5 mm的克氏针加工而成,一端采用滚动轴承固定于AB连接臂,另一端直接通过90°弯曲,插入CD连接臂上预先打好的直径1.5 mm的孔中。所有交叉杆的长度可以单独调整。A、B、C、D 4个连接点均形成单自由度铰链。内外侧各有一套上述4杆机构。点O为前后交叉韧带在矢状面投影的交叉点。P点为由O点向AB作垂线的垂点。实际上P点是股骨髁与胫骨平台的接触点,随着关节角度变化,P点在胫骨平台上前后滑动。

韧带并非刚性杆件,在活体状态韧带依靠预紧弹性维持膝关节面接触,在交变载荷作用环境下被简化为平均长度的刚性杆。仿生运动人工关节由分别通过骨穿针固定于股骨和胫骨的2个穿针外固定支架通过上述四杆机构相连构成。在股骨和胫骨上各通过2枚1.5 mm直径的骨穿针与骨干固定(见图2)。由于微创骨穿针外固定属于弹性固定,在关节再生过程中不会产生过度坚强的支撑,较少功能替代,但始终能保持膝关节相对固定的平衡运动轨迹。

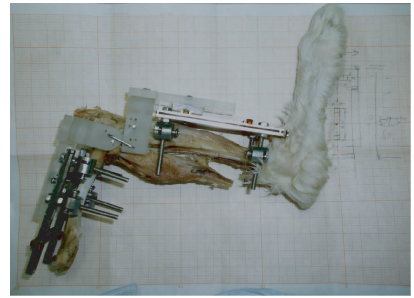


图2 外置式家兔人工膝关节全貌

Fig.2 The external artificial joints of rabbit viewed on a whole

## 1.2 实验动物模型建立

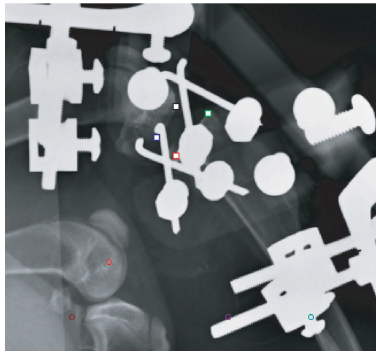
采用正常大耳白家兔7只,普通清洁级,5月龄,雄性,体重2.8~3.1 kg。麻醉:3%戊巴比妥钠,1 mL/kg体重。穿针:在股骨髁上20和40 mm从内向外各穿1枚1.5 mm克氏针,安装固定矩形框,调整位置后锁紧固定臂螺母,安装锁针器锁紧克氏针两端。同样,在胫骨结节下沿下5和35 mm水平,从内向外各穿1枚1.5 mm克氏针,安装固定矩形框,调整位置后锁紧固定臂螺母,安装锁针器锁紧克氏针两端。实验家兔苏醒后,下地自由活动。3天内肌注氨苄青霉素, $2 \times 10^5 \text{ U} \cdot (\text{d} \cdot \text{只})^{-1}$ 。

安装外置人工膝关节:根据X线侧位片计算模拟获得的矢状面参数,确定连接臂CD和AB的长度和前后交叉杆的长度,分别调整上下固定臂位置,至活动膝关节无卡死和运动阻力后,锁紧固定螺杆。

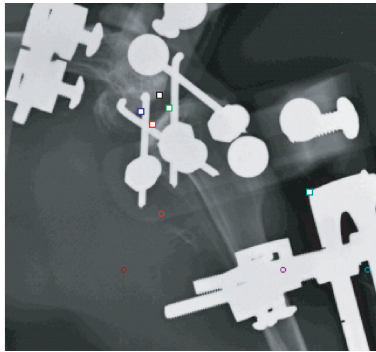
家兔膝关节关节截骨术:安装外置人工关节1周后,在股骨髁和胫骨平台同时截骨去除关节软骨及十字交叉韧带和半月板等结构,但不损伤肌腱起止点,保留关节囊及囊外韧带,保留髌骨和籽骨。术后苏醒后,立即下地自主活动。3天内肌注氨苄青霉素, $2 \times 10^5 \text{ U} \cdot (\text{d} \cdot \text{只})^{-1}$ 。截骨术后第9周开始,每天让实验家兔在室内2 m × 1 m空场地每2只1组自由追逐活动5~10 min,以增加活动量。

## 1.3 关节间隙测量

术后拍摄膝关节侧位X线片,通过X线片测量膝关节负重面间隙(见图3)。X线片拍摄时,采用2块500 mm × 300 mm亚克力(有机玻璃)多孔板和数根固定螺杆组装的特制固定装置固定实验家兔,以保证拍摄方向一致。



(a) 第1周



(b) 第12周

图3 安装外置人工膝关节行截骨术后膝关节侧位 X 线片

Fig. 3 Lateral X-ray film of rabbit knee after osteotomy under control of the external artificial joint (a) At the 1st week, (b) At the 12th week

#### 1.4 关节角度测量

测量过程中,实验家兔被固定于特制装置,膝关节被动固定于极限屈曲和伸直两种体位。通过侧位外观照相测量关节角度,以外侧露出体外的4个骨穿针端点为标志点,同一骨干上的2个标志点连成一条线,计算所得两条直线交角,作为股骨与胫骨所夹角度。极限伸直和极限屈曲体位角度的差值定义为膝关节活动度。拆除固定后和对侧正常膝关节角度通过极限位置的X线片测量。在侧位片上取股骨髁间窝后沿和大转子下缘为股骨轴线标志点,取胫骨结节水平胫骨后边缘点和后踝下 endpoint 连线作为胫骨轴线,计算膝关节屈伸位角度。

#### 1.5 在体观察关节内再生结构

截骨术后第16周末拆除外置式人工关节,行关节切开术,观察关节内再生结构并照相记录。切口愈合后继续观测步态,评价功能恢复。

## 2 结果

共7只实验家兔中,6例成功安装外置式人工关节;这6例中1例安装1周后,胫骨下位穿针处骨折,后在辅助固定下,4周后愈合;1例在最初骨穿针安装平台时股骨干骨折,随即附加髓内针固定,4周后愈合拆除髓内针,安装外置式人工关节继续入组实验。另1只在安装穿针过程中股骨干骨折,自然畸形愈合,出组未继续截骨实验。截骨后关节再生的6只实验家兔16周末拆除人工关节,自由活动。

### 2.1 主动功能活动观察

安装外置人工膝关节后自主活动,活动正常。关节截骨术后第1天活动减少,行动缓慢。截骨术后12周家兔活动基本恢复正常。负重步态测试显示,截骨后25周(16周末拆除外置式人工关节后9周),自主活动时,截骨再生(右)侧后足安静负重平均达到对侧后足的1/2。

### 2.2 关节矢状面被动转动活动度测量结果

术后矢状面被动活动度测量结果见表1。股骨与胫骨在矢状面夹角分别为:截骨术后第1周屈曲位( $144.7 \pm 15.62^\circ$ ),伸直位( $44.2 \pm 25.77^\circ$ ),活动度( $100.5 \pm 29.03^\circ$ );术后第12周屈曲位( $139.4 \pm 12.92^\circ$ ),伸直位( $40.4 \pm 22.04^\circ$ ),活动度( $99.0 \pm 23.39^\circ$ )。截骨术后12周与截骨术后第1周相比,屈曲位、伸直位和活动度都没有显著差异(见表2),说明矢状面关节转动活动范围正常,未产生骨性愈合或者纤维粘连。

至截骨术后第25周末(16周末拆除外置膝关节后9周),所有6只实验家兔截骨再生膝关节屈曲位( $148.3 \pm 4.75^\circ$ ),伸直位( $48.30 \pm 17.57^\circ$ ),活动范围( $100.0 \pm 20.80^\circ$ );而对侧(左侧)正常膝关节屈曲位( $148.3 \pm 7.5^\circ$ ),伸直位( $21.6 \pm 9.09^\circ$ ),活动范围( $126.7 \pm 6.88^\circ$ )(见表1)。

### 2.3 膝关节骨性关节间隙测量结果

截骨术后12周侧位X线见图3(b)。关节间隙测量结果见表3和表4。表3中部分空缺数据主要由于投照体位变化,人工关节支杆遮挡射线,导致无法确定负重面轮廓边缘。

表1 截骨术后膝关节矢状面活动度测量结果

Tab.1 Results of ROM of the rabbit knees in sagittal plane after osteotomy

动物号	术后第1周/(°)*			术后第12周/(°)*			术后第25周/(°)**			对侧正常/(°)**		
	屈	伸	活动度	屈	伸	活动度	屈	伸	活动度	屈	伸	活动度
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	122.8	68.6	54.2	128.5	33	95.5	153.9	34.9	118.9	141.6	12	129.6
3	136.3	36.8	99.5	120.9	53.8	67.1	146	32.6	113.4	149.4	32.6	116.8
4	144.6	36.5	108.1	140.9	17.3	123.6	148.5	67.1	81.4	151.6	17.6	133.9
5	144.6	0	144.6	141.9	14	127.9	153.4	29.7	123.7	160.2	33.3	126.9
6	170.1	66.6	103.5	147.9	65.1	82.8	141.3	63.3	78	139.2	18.8	120.4
7	149.6	56.7	92.9	156.5	59.2	97.3	146.9	62.1	84.8	148	15.2	132.8
平均	144.7	44.2	100.5	139.4	40.4	99	148.3	48.3	100	148.3	21.6	126.7
样本数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
标准差	15.62	25.77	29.03	12.92	22.04	23.39	4.75	17.57	20.8	7.51	9.09	6.88

注:\*角度通过体表标志测量,\*\*角度通过侧位X线片测量

表2 截骨术后第12周与截骨术后第1周矢状面活动度比较(*t*检验)

Tab.2 Comparison of ROM at the 1st week and the 12th week after osteotomy in sagittal plane

	<i>t</i> 值	自由度	<i>P</i> 值	
第1~12周屈曲	-1.11	5	0.317	无显著差异
第1~12周伸直	-0.46	5	0.664	无显著差异
第1~12周活动度	0.13	5	0.902	无显著差异

表4 截骨后不同时期截骨侧(右侧)膝关节负重面骨性关节间隙比较(配对*t*检验)

Tab.4 Comparison of the bony gaps of the rabbit knee at different period after osteotomy

	<i>t</i> 值	自由度	<i>P</i> 值	差异
术后1~12周	3.003	7	0.020	有显著差异
术后4~12周	3.465	8	0.009	有显著差异
术后8~12周	4.280	6	0.005	有显著差异

表3 截骨后膝关节负重面骨性关节间隙随愈合再生过程的变化

Tab.3 Variation of bony gaps of the rabbit knees with time after osteotomy

动物号	术后时间									
	截骨侧(右侧)骨性间隙/mm					正常侧(左侧)骨性间隙/mm				
	1	4	8	12	25	1	4	8	12	25
侧位片 伸直位	1*	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	4.9	4.2	3.9	2.7	1.2	1.5	1.0	1.9	1.1
	3	5.9	3.7	—	2.3	1.6	1.5	—	—	1.3
	4	6.3	3.9	2.9	1.5	—	1.3	1.2	1.5	—
	5	—	5.6	4.5	3.5	1.4	1.3	1.0	1.2	0.9
	6	1.4	1.5	2.5	1.6	0.8	—	—	1.3	—
	7	5.5	2.2	1.2	2.4	1.1	1.1	—	1.3	1.4
侧位片 屈曲位	1*	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	2.5	—	—	3.1	1.9	1.4	1.5	1.4	—
	3	—	—	—	1.3	0.7	1.3	—	—	1.4
	4	4.6	3.7	2.0	1.8	1.8	1.2	—	1.3	—
	5	—	4.7	4.6	4.4	2.2	—	—	1.4	1.6
	6	1.1	2.0	1.8	0.9	0.5	—	—	—	1.2
	7	5.7	—	—	—	2.1	1.0	—	1.41	1.1
平均	4.03	3.49	2.92	2.32	1.40	1.29	1.15	1.41	1.18	
样本数	11	9	8	11	11	9	4	8	8	
标准差	1.84	1.35	1.29	1.05	0.59	0.18	0.24	0.21	0.24	

注:\*1号实验家兔穿针过程股骨骨折,未截骨,出组



结果表明,到截骨术后 12 周,截骨侧骨性关节间隙明显减小,由截骨初期的 $(4.03 \pm 1.84)$  mm减小到 $(2.32 \pm 1.05)$  mm。同时 X 线片也显示,原始截骨平面在矢状面投影的直角状轮廓转变为圆钝轮廓,有些甚至可观察到细微波浪或刷状边缘,说明在关节大范围活动度存在的同时,截骨端部骨性再生也明显发生。但是,本文测量方法不能排除在长期负重情况下,骨穿针或外置膝关节缓慢松弛与塑性变形导致胫骨和股骨整体相互靠拢的可能,因而所得到的骨性关节间隙减小量可能并非完全来自截骨处的骨性再生生长。

而左侧正常膝关节骨性间隙基本不随时间变化,12 周内正常侧(左侧)膝关节伸直和屈曲状态获得的 30 次骨性关节间隙测量值的总平均值为 $(1.27 \pm 0.22)$  mm(见表 3)。

## 2.4 再生膝关节结构观察

截骨术后第 16 周末拆除外置式人工关节,通过关节切开术,观察到了关节囊内软骨、软骨下骨和类似韧带的纤维束再生。

**2.4.1 软骨下骨生长** 所有 6 只截骨再生实验兔大体观测显示,再生的股骨下端和胫骨上端已经占满关节囊内空间,但比对侧膨大。结合前述 X 线片测量结果,截骨后股骨下端和胫骨上端间骨性间隙逐渐减小,表明再生关节的软骨下骨生长,其结构和功能逐步恢复。

**2.4.2 新生软骨已覆盖截骨表面** 颜色和质地与截骨前关节软骨类似。关节面光滑,关节液透明并起肥皂泡样透明膜(见图 4)。

**2.4.3 再生韧带的观察** 所有 6 只截骨再生实验兔膝关节中,第 1 只(2 号兔)由于需要观察胫骨和股骨关节面软骨,清除了膝关节前部软组织(见图 4(d))外,其余 5 只均见有类似韧带的再生纤维束从股骨髁下部中间发出,连接到胫骨平台上(见图 5)。深部是否有多条类似纤维束连接,由于间隙内软组织阻挡未能探查。但抽屉试验平移明显,活动可以将其拉紧或松弛。

## 3 讨论

截骨造成新鲜出血中蕴含的具备增殖分化能力的骨髓基质干细胞在特定阶段具备分化成骨组织和更多其他组织的功能,能并行产生多种类型的间质

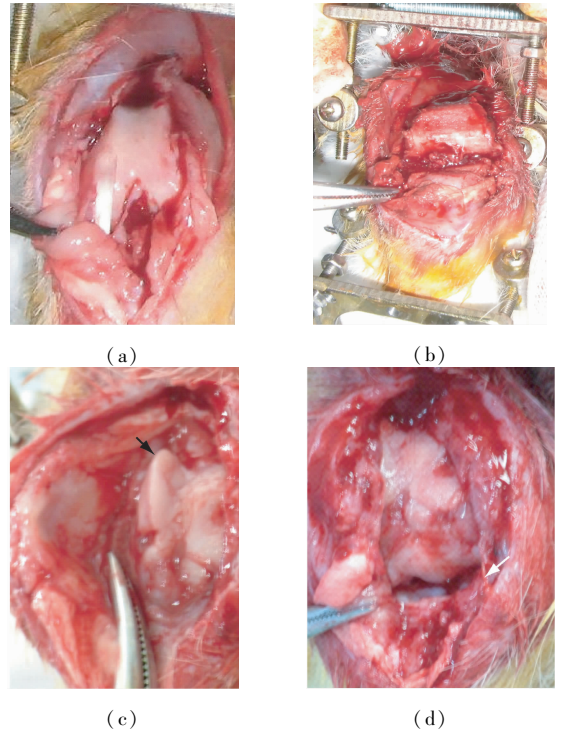


图 4 截骨前(a),截骨术中(b),截骨术后 16 周切开兔膝关节观察再生的髌股关节面(c, 黑色箭头)和胫股关节间隙(d, 白色箭头)  
Fig.4 View of rabbit knee before osteotomy (a), during osteotomy (b), regenerated femur-patella joint surface (c, black arrow), and gap between tibial-femur joint surfaces (d, white arrow) at 16th week after osteotomy

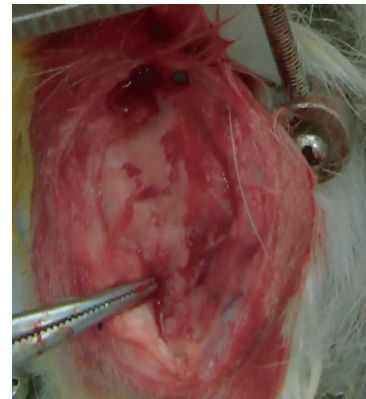


图 5 类似韧带的纤维束(止血钳所指),连接再生的股骨髁下端和再生的胫骨平台  
Fig.5 Fibro-bundle linkage (pointed by the clamp) similar with ligament, which started from bony structure of regenerated femoral condyle and inserted into regenerated tibial plateau

细胞,包括成骨细胞、成软骨细胞、脂肪细胞、成肌细胞和成纤维细胞等 5 种。在功能适应过程中,不同的体内环境尤其是生物力学环境决定了所生成分化

组织的生物力学性质。本文通过外置人工关节使截骨后的膝关节大范围活动,创造了利于关节软骨生成的生物力学环境。

尽管本实验再生结果可能被传统认识归类为“假关节”,但是关节活动功能的存在表明再生关节具备了相应的物质和结构基础。本文认为,在骨器官的两端,“关节软骨”属于“骨”器官的一部分,其再生依赖于骨的再生。因此,截骨造成新鲜创面,在新骨再生的过程中,功能活动使两骨界面转动和滑移,新的关节软骨及其他特化结构随之形成。

本文所采用的外置式仿生运动人工关节为家兔膝关节再生保留了再生空间,提供了一种运动模拟环境。与家兔胫骨骨干横形截骨滑动固定骨折愈合实验<sup>[6-7]</sup>相对照,骨干骨折后控制断端微动,所得结果为骨性愈合;而本文采用大范围仿生运动外置式人工关节控制家兔膝关节截骨后再生,结果不是骨性融合,而是新生关节形态逐渐形成,运动功能基本恢复。这两种截然不同的结果从两个方面说明骨折愈合过程对生物力学环境的适应性<sup>[2,8]</sup>。作为骨折愈合的一种结果来思考,本文结果说明,仿生运动生物力学环境下,正常家兔膝关节内截骨后再生是可能的。

本文研究中发现的主要问题有:(1)拆外置人工关节后仍然具有相对膨大的关节形态;(2)拆除人工关节后第1周(术后第17周),再生膝关节相对松弛;(3)截骨后第25周(拆除外置人工关节后第9周),静息负重平均为对侧的1/2(见表5);(4)需要通过组织学染色技术进一步研究,完成再生组织鉴定;(5)实验动物样本需要增加。由于这些问题的存在,目前还无法完全证明本文再生结

表5 截骨术后第25周双侧后肢负重比较

Tab.5 Comparison of weight bearing of two legs at the 25th week after osteotomy

编号	左侧负重/kg	右侧负重/kg	右侧/左侧
2	1.75	0.67	0.38
3	1.54	0.83	0.54
4	1.46	0.80	0.55
5	1.19	0.66	0.55
6	1.40	0.95	0.68
7	1.75	0.63	0.36
平均值	1.51	0.76	0.51
样本数	6	6	6
标准差	0.216	0.123	0.119

果不是代偿性增生。

虽然人工膝关节从最早外置的单轴铰链到现在内置的立体仿形精确制造的实体,已有质的飞跃<sup>[9]</sup>,但为了给再生关节留出空间,本文采用相对简洁可调的双侧四杆机构外置式人工膝关节。由于穿针部位选择在骨干皮质骨,避免了在松质骨区域穿针出现松脱和渗血等不利情况。从关节活动度测试结果看,直到截骨术后25周,手术侧再生关节活动范围仍然比对侧正常关节活动范围平均少约26°,说明外置人工关节在制作工艺上需要改进,安装调整过程也需要更加精细。关节间隙和关节活动测试手段也需要进一步完善。通过增加实验动物数量,优化选择骨穿针针径,操作熟练后,可以逐渐提高安装成功率和与原始关节的配准度。从实用角度,本文方法可以转化应用到人体膝关节骨折治疗<sup>[10]</sup>,也可以转化用于为人膝关节再生提供良好的生物力学环境。

## 参考文献:

- [1] 曲绵域. 机械因素对关节软骨修复与再生影响的实验病理学研究[J]. 北京医学院学报, 1966, 2: 127-130.
- [2] 钱民全, 陶祖莱, 孟和, 等. 骨折愈合与应力的适应性假设[J]. 北京生物医学工程, 1984, 4(1): 28-32.
- [3] 寿柏泉, 孟昭业, 陈忠豪, 等. 聚四氟乙烯薄膜在动物假关节成形术中作填隔物的实验研究[J]. 口腔材料器械杂志, 1995, 4(4): 154-155.
- [4] 魏杰, 张久元, 常宝国, 等. 关节撑开和运动促进关节软骨修复的实验研究[J]. 中华现代外科学杂志, 2004, 1(1): 13-14.
- [5] 钟红刚, 李茂林, 孟和. 平面四杆机构膝关节固定器: 中国, 2141264[P]. 1993.
- [6] 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断端位移测试[J]. 中国骨伤, 2001, 14(10): 604-605.
- [7] 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.
- [8] 董福慧, 关继超, 赵勇, 等. 骨折愈合应力适应性研究[J]. 中国骨伤, 2001, 14(1): 14-16.
- [9] 周殿阁, 吕厚山, 方竞, 等. 股骨远端关节面几何特征在人工关节设计中的意义[J]. 中华骨科杂志, 2002, 22(5): 288-292.
- [10] 孟和, 黄克勤. 骨科复位固定器疗法[M]. 天津: 天津科技出版社, 1986.