

# 单边和环形外架在感染性胫骨骨不连治疗中的对比研究

聂少波<sup>1</sup>, 吴韬光<sup>2</sup>, 郝明<sup>2</sup>, 王锬<sup>2</sup>, 纪辉<sup>3</sup>, 张群<sup>2</sup>

(1. 解放军总医院第一医学中心骨科, 北京 100853; 2. 解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100048; 3. 解放军总医院第一医学中心, 麻醉手术中心, 北京 100853)

**【摘要】** 目的: 对比单边和环形外架在感染性胫骨骨不连中的治疗效果, 探索成骨能力更好和并发症更少的外固定架构型。方法: 回顾性纳入 2010 年 1 月至 2014 年 12 月治疗的 150 例感染性胫骨骨不连患者, 符合纳入和排除标准的患者根据外固定类型分为单边组和环形组, 收集两组患者的一般资料和围手术信息, 通过像素比评价新生骨质量, 通过并发症评估治疗效果, 并根据并发症情况分析治疗注意事项。结果: 共 64 例胫骨中段感染性骨不连患者纳入研究, 单边组 26 例, 环形组 38 例。两组患者一般资料比较差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。两组患者新生骨像素比分别为 0.91~0.97 (0.94±0.03) 和 0.93~0.97 (0.95±0.02), 差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。单边组外固定指数为 34.1~50.6 (42.3±8.3) d/cm, 环形组为 44.5~56.1 (45.8±10.3) d/cm, 差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。单边组 7 例 (26.9%) 存在并发症, 环形组 5 例 (13.2%), 组间比较差异无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 但单边组 5 例发生足下垂, 通过后续治疗后缓解, 环形组无此情况。单边组的下地时间比环形组晚 ( $P<0.05$ )。结论: 在治疗感染性骨不连时, 单边和环形外架都能取得满意的骨愈合结果, 且效果相当。对于骨质疏松严重, 并发症多, 需要早期下地的患者建议采用环形外架固定。如果选择单边外架, 预期延长时间长, 固定时间久的建议采用羟基磷灰石涂层螺钉固定, 严密监测踝关节活动, 防止足下垂畸形。

**【关键词】** 感染; 骨不连; 胫骨; 外固定架; 骨搬运

**【临床试验注册】** 中国临床试验注册中心 注册号: ChiCTR2200057427

中图分类号: R681

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2022.10.002

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



**Comparative study of monolateral and circular fixator in the treatment of infectious tibial nonunion** NIE Shao-bo, WU Tao-guang, HAO Ming, WANG Kun, JI Hui, and ZHANG Qun\*. \*Department of Orthopaedics Medicine, the Fourth Medical Center, PLA General Hospital, Beijing 100048, China

**ABSTRACT Objective:** To compare treatment effect of monolateral and circular external fixator in infectious tibial nonunion and to explore external fixation structure with better osteogenic ability and fewer complications. **Methods:** A retrospective analysis was performed on 150 patients with infectious tibial nonunion admitted from January 2010 to December 2014. Patients who met the inclusion and exclusion criteria were divided into monolateral fixator group and circular fixator group according to the type of external fixation. Demographic and perioperative data of the two groups were collected. New bone quality was assessed by pixels ratio, treatment effect was assessed by complications. Notes for treatment was explored by case analysis. **Results:** A total of 64 patients with infectious mid-tibial nonunion were included, 26 in monolateral fixator group and 38 in circular fixator group. There was no difference in demographic data between two groups. The pixel ratio of new bone between two groups was from 0.91 to 0.97 with an average of (0.94±0.03), and from 0.93 to 0.97 with an average of (0.95±0.02), respectively, with no statistical significance ( $P>0.05$ ). The external fixation index was from 34.1 to 50.6 with an average of (42.3±8.3) days/cm in monolateral fixator group and from 44.5 to 56.1 with an average of (45.8±10.3) days/cm in the circular fixator group, and the difference was not statistically significant ( $P>0.05$ ). There were 7 cases (26.9%) of complications in monolateral fixator group and 5 cases (13.2%) in circular fixator group, the difference was not statistically significant ( $P>0.05$ ), but 5 cases of foot ptosis in monolateral fixator group and none in circular fixator group. The time of weight bearing in monolateral fixator group was later than that in circular fixator group, and the difference was statistically significant ( $P<0.05$ ). **Conclusion:** Monolateral and circular fixators can achieve equivalent bone formation in the treatment of infected tibial nonunion. Circular fixator is recommended for patients with severe osteoporosis or concomitant medical diseases requiring early weight bearing. Hydroxyapatite coated screws are recommended if a monolateral external fixator is selected when the expected enlarged length

通讯作者: 张群 E-mail: zhangqun301@sina.com

Corresponding author: ZHANG Qun E-mail: zhangqun301@sina.com

is long and the fixation time is long and close monitoring of the ankle movement is required to avoid foot droop.

**KEYWORDS** Infection; Bone nonunion; Tibia; External fixator; Bone transport

由于感染和彻底清创后骨缺损的同时存在,胫骨骨不连治疗不仅时间长、费用高,而且效果不佳。骨搬移由于可同时控制感染和牵张成骨修复骨缺损,并可获得 90% 以上的治疗成功率<sup>[1]</sup>,已经成为胫骨骨不连治疗的第一选择。单边和环形外架固定是骨搬移中最常用的两种技术手段,两者在成骨愈合和并发症等方面的优劣一直存在争议。Rohilla 等<sup>[2]</sup>通过 70 例患者的 X 线片和 CT 结果分析认为单边外架成骨能力更好,且并发症少。而 Quinnan<sup>[3]</sup>的研究却发现环形外架在成骨质量上更好,并发症也少。为明确单边和环形外架在感染性胫骨骨不连中的具体治疗效果,本研究回顾性分析了 150 例胫骨中段骨不连患者,对比两种外架在胫骨骨不连中的成骨能力和治疗效果,现报告如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例选择

纳入标准:诊断为胫骨骨不连<sup>[4]</sup>;患肢有窦道;彻底清创后骨缺损>3 cm;缺损位于胫骨中 1/3。排除标准:其他原因造成的骨不连;合并神经损伤;年龄<16 岁;病理性骨折;干骺端缺损;合并其他可能影响骨折愈合的因素;病例不全,未完成随访的患者。

### 1.2 一般资料

回顾性分析 2010 年 1 月至 2014 年 12 月就诊的胫骨骨不连患者 150 例,其中男 123 例,女 27 例,年龄 16~77(39.4±23.4)岁。本研究已获得解放军总医院伦理委员会批准(伦理号:S2022-113-01)。

### 1.3 治疗方法

所有患者采用硬膜外麻醉,仰卧在可透视的手术床上,首先彻底清创,拆除原有固定材料,显露病灶。彻底切除死骨或者硬化骨,直到健康渗血的骨面(辣椒征),碘伏及 1 500 ml 以上的盐水彻底冲洗创面后,更换新的无菌器械及手套,暂时封闭伤口。对于不能闭合的伤口也尽量予以缩小处理。

**1.3.1 单边外架组** 彻底清创后,单边外架组采用 Orthofix 外架(北京万峰世纪医疗器械有限公司),首先在透视引导下将外固定架固定针分别于胫骨近端平行于膝关节的水平和胫骨远端平行于踝关节的水平植入胫骨。之后连接单边外架,透视确认胫骨力线后在导向模块的引导下和胫骨解剖轴呈直角置入余下螺钉,连接固定外架。固定螺钉选择直径为 6 mm 的羟基磷灰石涂层的固定钉。

在预计截骨位置的前外和前内侧分别做 1 cm 切口,切开皮肤及皮下组织,锐性切开骨膜,显露胫骨干,线锯在骨膜下截断胫骨。打开暂时封闭的伤

口,调整胫骨力线后截骨端加压,彻底冲洗伤口后闭合所有切口。

**1.3.2 环形外架组** 彻底清创后,环形外架组采用 Ilizarov 外架(北京瑞朗医疗器械有限公司),首先固定胫骨两端的固定针。连接环形外架,透视下调整胫骨力线及环架中间的固定环位置,以适应骨缺损区域。远近端分别两环三针固定,骨搬移的环架在计划搬移骨段的正中,2 枚固定针固定,如果搬移距离较长的可以附加半钉固定。对于前期手术次数多,关节僵硬以及骨缺损较长的患者,同时行足部外架固定,便于术后踝关节牵拉。I 期矫正踝关节僵硬,防止足下垂。

外架固定完成后,在预先设计截骨位置前外和前内侧分别做 1 cm 切口,直接到骨膜下分离显露胫骨,线锯截断胫骨,搬移骨段逆向调节以保证截骨区加压。再次打开暂时封闭的缺损区伤口,再次冲洗,开放髓腔并确定断端空间位置,必要时调整,彻底止血后,闭合所有伤口。

**1.3.3 术后处理** 术后 2 代广谱抗生素预防感染,细菌培养结果回报后根据药敏结果调整抗生素应用 1 周。麻醉恢复后鼓励早期下地负重并进行膝关节和踝关节的主动和被动功能锻炼。

术后静置 8~10 d 后开始骨搬移<sup>[5]</sup>,搬移速度为 1 mm/d,分 4 次进行。术后每周复查 X 线片<sup>[6]</sup>,监测评估骨搬移力线及愈合情况,必要时根据复查情况动态调整下次复查时间。如果搬移过程中发现明显的对位对线畸形,二次手术矫正力线,包括断端新鲜化和嵌顿软组织修整。整个搬移过程中,指导患者自行调整外架及针道护理<sup>[7]</sup>,避免针道感染。临床和影像学评估结果满足愈合标准后拆除外固定架。

### 1.4 观察项目与方法

**1.4.1 成骨质量和围手术期情况** 统计患者年龄、性别等基线资料,按照外架固定类型不同分为单边和环形外架两组。统计骨缺损长度、总的带架时间、负重时间、外固定指数以及并发症。外固定指数<sup>[8]</sup>采用带架时间除以骨缺损距离表示。通过影像学资料进行骨愈合情况评估,骨愈合定义为正侧位 X 线片 4 个骨皮质中至少 3 个有连续性骨痂通过<sup>[9]</sup>。畸形愈合定义<sup>[10]</sup>为轴向畸形>7°,肢体不等长>2.5 cm。骨愈合质量用 6 个月时的像素比值定义,通过将延长区相邻的近端和远端骨段的像素值的平均值除以再生骨段像素值来确定<sup>[11]</sup>。

**1.4.2 并发症** 电话随访患者进行并发症评估及确定非预期二次手术情况等。并发症评价根据 Paley

的标准定义<sup>[7]</sup>。在肢体延长过程中发生的困难,被细分为问题、障碍和并发症。问题被定义为在牵引或固定期间出现的潜在的预期困难,并在治疗结束时通过非手术手段完全解决。障碍的定义是在牵引或固定期间出现的潜在的预期困难,并在治疗期结束时通过手术手段完全解决。并发症包括任何局部或全身的术中或围手术期并发症,在治疗期结束时仍未解决的牵引或固定困难,以及任何早期或晚期的治疗后困难。真正并发症分为轻度并发症和重度并发症。轻度并发症不影响最终结果,或需要非手术或小手术干预,而重度并发症需要更复杂和计划外的手术干预或导致永久的后遗症。钉道感染按照临床表现分为 3 级<sup>[12]</sup>:1 级,皮肤有红斑或脓性分泌物;2 级,同时出现皮肤红斑和脓性分泌物;3 级,影像学显示骨溶解合并 2 级临床表现。其中 1 级和 2 级为浅表感染,3 级为深部感染。

### 1.5 统计学处理

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。连续变量用均数±标准差( $\bar{x}\pm s$ )描述,分类变量用数值和百分比描述。两组样本之间的连续变量和分类变量分别用独立样本 *t* 检验和 Fisher 检验;两组之间的总体并发症发生率比较采用  $\chi^2$  检验。以  $P<0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 基线资料

共 64 例患者满足纳入和排除标准最终纳入本研究,其中男 54 例,女 10 例,年龄 16~77(39.4±21.5)岁,骨缺损长度 3~18(8.1±8.2) cm,随访时间 24~38(30.5±6.5)个月。单边外架固定的单边组 26 例,其中男 21 例;女 5 例;年龄 18~65(37.7±13.6)岁;19 例既往损伤为开放性损伤;受伤至接受骨搬移时间 6~13(7.3±5.8)个月;14 例既往手术为钢板内固定,既往手术次数 1~8(3.5±2.3)次;骨缺损长度 3~15(7.4±2.3) cm;5 例合并糖尿病。环形外架固定的环形组 38 例,其中男 33 例,女 5 例;年龄 16~77(40.8±13.4)岁;29 例既往损伤为开放性损伤;受伤至接受骨搬移手术的时间 9~24(8.9±7.8)个月;

20 例既往手术为外固定架固定,既往手术次数 2~13(3.7±2.6)次;骨缺损长度 3~18(8.3±3.5) cm;11 例合并糖尿病。两组患者基线资料比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性(表 1)。

### 2.2 成骨质量和围手术期情况

6 个月时像素比值,单边组 0.91~0.97(0.94±0.03),环形组 0.93~0.97(0.95±0.02),两组比较差异无统计学意义( $P>0.05$ )。两组手术时间比较差异无统计学意义( $P>0.05$ )。在负重时间上,单边组的负重时间晚于环形组( $P<0.05$ )。两组延长时间、带架时间比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。单边组外固定指数 34.1~50.6(42.3±8.3) d/cm,环形组为 44.5~56.1(45.8±10.3) d/cm,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。见表 2。典型病例见图 1-2。

### 2.3 并发症

单边组 7 例发生并发症,环形组 5 例发生并发症,组间差异无统计学意义( $P>0.05$ )。两组患者均未见断端不愈合的情况;单边组对线不佳 2 例,环形组 3 例;单边组无感染复发情况,环形组 1 例;单边组无再骨折情况,环形组 1 例;单边组 5 例延长过程中发生足下垂,而环形组无此情况。

## 3 讨论

本组患者治疗结果显示单边和环形外架在治疗胫骨中段感染性骨不连时成骨作用相似,骨愈合情况相当,在并发症发生率上也无明显差异,但环形组下地负重时间更早。在使用单边外架延长时,足下垂发生率高也是个需要注意的问题。

### 3.1 成骨质量的区别

骨搬移目前是治疗胫骨骨缺损的主要手段,不论单边还是环形外架都属于外固定材料,都会对患者的生活带来一定的不便,因此尽快完成新生骨的矿化,缩短固定时间,减少患者的不适一直是骨科医生追求的目标。新生骨的质量决定了外固定架固定时间和治疗历程。单边外架属于相对稳定固定,理论上胫骨在固定后承受的力学刺激更多,愈合应该更快。Hamiti 等<sup>[13]</sup>通过单边外架治疗骨缺损>6 cm 的胫骨骨不连患者,外固定指数在 37.1 d/cm,远快于

表 1 两组感染性胫骨骨不连患者基线资料比较

Tab.1 Comparison of general data of patients with infections tibial nonunion between two groups

组别	例数	性别(例)		年龄 ( $\bar{x}\pm s$ ,岁)	损伤类型(例)		损伤至接受骨搬移 时间( $\bar{x}\pm s$ ,月)	既往固定方式(例)			手术次数 ( $\bar{x}\pm s$ ,次)	骨缺损长度 ( $\bar{x}\pm s$ ,cm)	糖尿病 (例)
		男	女		闭合	开放		外架	钢板	髓内钉			
单边组	26	21	5	37.7±13.6	7	19	7.3±5.8	9	14	3	3.5±2.3	7.4±2.3	5
环形组	38	33	5	40.8±13.4	9	29	8.9±7.8	20	12	6	3.7±2.6	8.3±3.5	11
检验值		$\chi^2=0.16$		$\chi^2=-0.90$	$\chi^2=0.07$		$t=-0.89$	$\chi^2=3.19$			$t=-0.32$	$t=-1.15$	$\chi^2=0.78$
P 值		0.69		0.37	0.79		0.38	0.20			0.75	0.25	0.37

环形外架固定,固定时间短,而且术后并未发生再骨折等并发症。Rohilla 等<sup>[2]</sup>也支持单边外架成骨更快更好。但也有学者持不同意见,Kinik 等<sup>[14]</sup>采用环形外架治疗了一组骨缺损在 8 cm 以上的患者,骨愈合

优良率为 100%,且外固定指数每厘米 1.49 个月,因此认为环形外架更稳定,成骨能力更好。但以上研究都将胫骨 3 个部位骨折混在一起分析,因此可能存在偏倚因素,并且在评价新生骨质量时也都采用的

表 2 两组感染性胫骨不连患者骨愈合情况及围手术期指标比较

Tab.2 Comparison of fracture healing and perioperative outcome of patients with infections tibial nonunion between two groups

组别	例数	像素比值 ( $\bar{x}\pm s$ )	手术时间 ( $\bar{x}\pm s$ , min)	负重时间 ( $\bar{x}\pm s$ , d)	延长时间 ( $\bar{x}\pm s$ , d)	带架时间 ( $\bar{x}\pm s$ , d)	外固定指数 ( $\bar{x}\pm s$ , d/cm)	钉道感染(例)	
								未感染	1 级或 2 级
单边组	26	0.94±0.03	175.3±32.6	2.3±1.9	85.2±12.3	259.3±120.3	42.3±8.3	16	10
环形组	38	0.95±0.02	184.6±23.4	1.3±1.2	91.3±20.3	274.5±183.2	45.8±10.3	26	12
检验值		$t=-1.60$	$t=-1.33$	$t=2.58$	$t=-1.37$	$t=-0.37$	$t=-1.44$	$\chi^2=0.32$	
P 值		0.11	0.19	0.01	0.18	0.71	0.16	0.77	



图 1 患者,男,16 岁,胫腓骨开放骨折术后感染性骨不连 1a,1b. 术前正侧位 X 线片显示胫骨中段远段骨不连,累计范围 3.5 cm 1c,1d. 更换骨搬运单臂外架术后正侧位 X 线片示病灶缩短闭合,胫骨上段截骨备延长 1e,1f. 术后 1 个月正侧位 X 线片示延长到 3.5 cm 1g,1h. 术后 2 个月正侧位 X 线片示新生骨矿化满意 1i,1j. 术后 3 个月正侧位 X 线片示新生骨改建完成,拆除外固定架 1k,1l. 术后 9 个月正侧位 X 线片示病灶区和延长区无畸形等并发症

Fig.1 A 16-year-old male, infected tibial nonunion after open fracture of tibia and fibula 1a,1b. Nonunion in the middle and distal tibia with a cumulative range of 3.5 cm was shown on preoperative anteroposterior and lateral X-ray views 1c,1d. Postoperative anteroposterior and lateral X-rays showed that the original external fixator was replaced by a monolateral bone transport external fixator. The lesion was shortened and closed and the proximal tibia was osteotomized to prepare for lengthening 1e,1f. Anteroposterior and lateral X-rays at 1 month postoperatively showed a 3.5 cm extension of distraction osteogenesis 1g,1h. Satisfactory mineralization of new bone was demonstrated by anteroposterior and lateral X-rays at 2 months after operation 1i,1j. The new bone remodeling was completed, and the external fixator was removed and visualized on anteroposterior and lateral X-rays 3 months after surgery 1k,1l. At 9 months follow-up, the anteroposterior and lateral X-rays showed no complications in the lesion and lengthened segment

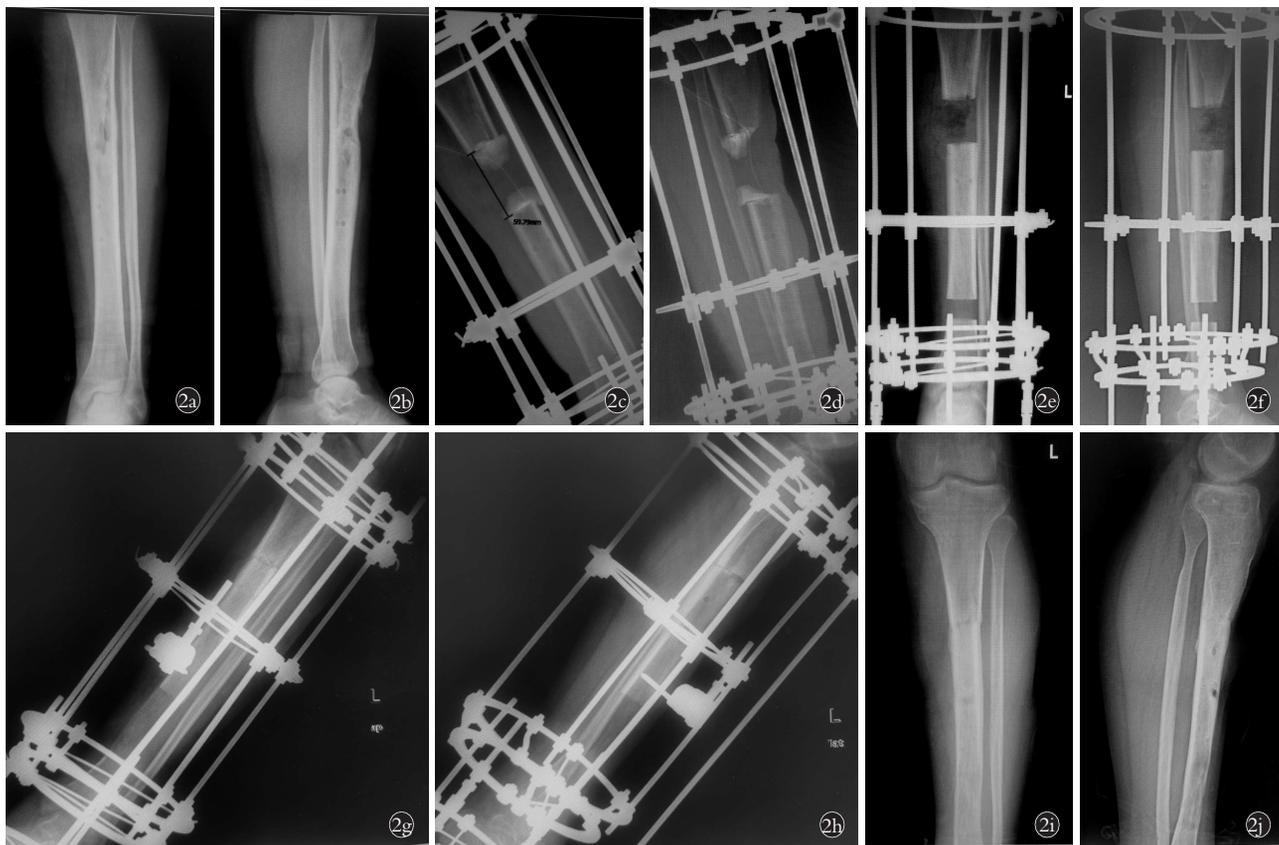


图 2 患者,男,42 岁,胫骨骨折术后骨髓炎 2a,2b. 术前正侧位 X 线片示胫骨中段感染性病灶 2c,2d. 术后正侧位 X 线片示骨缺损 6 cm 2e,2f. 术后 2 个月正侧位 X 线片示骨延长过程 2g,2h. 术后 5 个月正侧位 X 线片示骨延长断端接触,延长区新生骨形成满意 2i,2j. 术后 18 个月随访正侧位 X 线片示感染控制,新生骨及病灶区愈合良好,无畸形等并发症

Fig.2 A 42-year-old male, osteomyelitis after tibial fracture surgery 2a, 2b. An infectious lesion in the middle tibia was shown on preoperative anteroposterior and lateral X-rays 2c, 2d. A bone defect of 6 cm was shown on postoperative anteroposterior and lateral X-rays 2e, 2f. The bone lengthening process was shown on anteroposterior and lateral X-rays 2 months after surgery 2g, 2h. Anteroposterior and lateral X-rays at 5 months after operation showed the contact of the dock site and the new bone formation in the extension area was satisfactory 2i, 2j. At 18 months follow-up, there was no recurrence of infection and no deformity of new bone and dock site were shown on anteroposterior and lateral X-rays

术者的主观标准。本研究排除胫骨近端和远端的病例,只纳入中段缺损患者,并且纳入像素比作为评价新生骨质量的客观标准。像素比是最近提出的一个评价新生骨质量的客观指标,在评估新生骨质量时简单客观,一致性好<sup>[15]</sup>。本研究结果发现两组在像素比上无差异,提示成骨能力并无明显差异,但是下地时间不同,考虑更稳定的环形外架下地时间早,负重早,中和了不稳定外架的力学刺激作用,最终造成了两组患者成骨的结果相当。

### 3.2 并发症的区别

并发症也是感染性胫骨骨不连治疗中一个常见的问题,其中钉道感染、对线不良、关节僵硬是最常见的并发症<sup>[16]</sup>。Pommer 等<sup>[17]</sup>通过随机对照试验发现,羟基磷灰石涂层针增加了对骨骼的固定,减少了牵张成骨外固定时的感染和松动率(0 vs 13%)。但 Stoffel 等<sup>[18]</sup>在综述中并未发现感染率的差别,但松动率上有一定效果。Pizà 等<sup>[19]</sup>通过对比研究发现,羟

基磷灰石涂层的螺钉和普通螺钉相比感染率并无明显差异,但是松动率上明显低于普通螺钉(4% vs 80%)。对线不良也叫轴向偏移<sup>[20]</sup>,除了和术者的力线评估有关外,主要还和搬移过程中螺钉松动、不能维持骨块搬移轴线有关。本研究中,单边外架和环形外架在钉道感染率上并无明显差异,也支持羟基磷灰石涂层的螺钉可能并不能有效减少钉道感染的发生,但是在松动了确实较少,从而导致对线不良少于环形外架,因此总的并发症发生率两组并无明显差异。另外,本研究使用的单边外架固定时并未固定足部,因此足下垂发生率较高;而环形外架在固定过程中,可以附加足踝部固定,在牵张过程中,给予足踝部牵拉活动,避免了足下垂。在实际应用中,建议单边外架固定时,如果预期延长长度长、固定时间久,仍建议采用羟基磷灰石涂层的螺钉固定,并且在延长过程中注意足下垂的监测,尽量早期干预,避免畸形发生。而对于环形外架固定,应该控制钉道感染,

避免松动造成轴向对线不良。

本研究尚存在一些不足之处。首先,本研究纳入患者的年龄跨度较大,可能会对成骨能力评估造成干扰,但这也更接近临床实际情况,对临床应用有一定的指导作用。其次,本研究属于回顾性研究,但本研究制定了相对严格的纳入和排除标准,尽量排除了不相关因素的干扰,所以研究结论仍具有一定的临床意义。最后,本研究并未纳入吸烟、既往史等可能干扰成骨过程的因素,因为回顾性调查的原因,这些因素可能因为回忆偏倚对结果造成不良影响,因此未来还需要进一步的进行前瞻性的研究,纳入患者满意度以及心理状态等因素,综合判断单边和环形外架的治疗效果。

总之,在治疗感染性骨不连时,单边和环形外架都能取得满意的骨愈合结果,且效果相当。对于骨质疏松严重,并发症多,需要早期下地的患者建议采用环形外架固定。如果选择单边外架,预期延长长度长,固定时间久的建议采用羟基磷灰石涂层螺钉固定,严密监测踝关节活动,防止足下垂畸形。

#### 参考文献

- [1] Li R, Zeng C, Yuan S, et al. Free flap transplantation combined with Ilizarov bone transport for the treatment of severe composite tibial and soft tissue defects[J]. J Int Med Res, 2021, 49(5): 3000605211017618.
- [2] Rohilla R, Wadhvani J, Devgan A, et al. Prospective randomised comparison of ring versus rail fixator in infected gap nonunion of tibia treated with distraction osteogenesis[J]. Bone Joint J, 2016, 98-B(10): 1399-1405.
- [3] Quinnan SM. Segmental bone loss reconstruction using ring fixation[J]. J Orthop Trauma, 2017, 31(Suppl 5): S42-S46.
- [4] Morgenstern M, Athanasou NA, Ferguson JY, et al. The value of quantitative histology in the diagnosis of fracture-related infection[J]. Bone Joint J, 2018, 100-B: 966-972.
- [5] Zhang Q, Zhang W, Zhang Z, et al. Accordion technique combined with minimally invasive percutaneous decortication for the treatment of bone non-union[J]. Injury, 2017, 48(10): 2270-2275.
- [6] Peng C, Liu K, Tian Q, et al. Evaluation of complications associated with bifocal bone transport as treatment for either proximal, intermediate or distal femoral defects caused by infection: outcome analysis of 76 patients[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2022, 23(1): 132.
- [7] Liu Y, Yushan M, Liu Z, et al. Complications of bone transport technique using the Ilizarov method in the lower extremity: a retrospective analysis of 282 consecutive cases over 10 years[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21(1): 354.
- [8] Yushan M, Ren P, Abula A, et al. Bifocal or trifocal (Double-Level) bone transport using unilateral rail system in the treatment of large tibial defects caused by infection: a retrospective study[J]. Orthop Surg, 2020, 12(1): 184-193.
- [9] Rohilla R, Sharma PK, Wadhvani J, et al. Prospective randomized comparison of quality of regenerate in distraction osteogenesis of ring versus monolateral fixator in patients with infected nonunion of the tibia using digital radiographs and CT[J]. Bone Joint J, 2019, 101-B(11): 1416-1422.
- [10] Borzunov DY. Long bone reconstruction using multilevel lengthening of bone defect fragments[J]. Int Orthop, 2012, 36(8): 1695-1700.
- [11] Bafor A, Duncan ME, Iobst CA. Evaluating the utility of the pixel value ratio in the determination of time to full weight-bearing in patients undergoing intramedullary limb lengthening[J]. Strategies Trauma Limb Reconstr, 2020, 15(2): 74-78.
- [12] Liu K, Abulaiti A, Liu Y, et al. Risk factors of pin tract infection during bone transport using unilateral external fixator in the treatment of bone defects[J]. BMC Surg, 2021, 21(1): 377.
- [13] Hamiti Y, Yushan M, Lu C, et al. Reconstruction of massive tibial defect caused by osteomyelitis using induced membrane followed by trifocal bone transport technique: a retrospective study and our experience[J]. BMC Surg, 2021, 21(1): 419.
- [14] Kinik H, Kalem M. Ilizarov segmental bone transport of infected tibial nonunions requiring extensive debridement with an average distraction length of 9, 5 centimetres. Is it safe[J]. Injury, 2021, 52(8): 2425-2433.
- [15] Zak L, Tiefenboeck TM, Wozasek GE. Bone reconstruction: Subjective evaluation and objective analysis based on conventional digital X-rays-a retrospective evaluation[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2021, 107(8): 103081.
- [16] 彭瑞健, 张永红, 李晓辉, 等. 手风琴技术用于骨搬运治疗胫骨骨缺损[J]. 中国骨伤, 2018, 31(9): 824-828. PENG RJ, ZHAGN YH, LI XH, et al. Accordion operation for the bone transport in treating tibial bone defect[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2018, 31(9): 824-828. Chinese with abstract in English.
- [17] Pommer A, Muhr G, Dávid A. Hydroxyapatite-coated Schanz pins in external fixators used for distraction osteogenesis: a randomized, controlled trial[J]. J Bone Joint Surg Am, 2002, 84(7): 1162-1166.
- [18] Stoffel C, Eltz B, Salles MJ. Role of coatings and materials of external fixation pins on the rates of pin tract infection: a systematic review and meta-analysis[J]. World J Orthop, 2021, 12(11): 920-930.
- [19] Pizù G, Caja VL, González-Viejo MA, et al. Hydroxyapatite-coated external-fixation pins. The effect on pin loosening and pin-track infection in leg lengthening for short stature[J]. J Bone Joint Surg Br, 2004, 86(6): 892-897.
- [20] 刘亦杨, 沈立锋, 张春, 等. 骨搬运技术治疗下肢长骨干慢性骨髓炎伴骨缺损术后骨性愈合不良的原因分析及对策[J]. 中国骨伤, 2018, 31(6): 556-561. LIU YY, SHEN LF, ZHANG C, et al. Causes and strategies for postoperative bone nonunion after bone transport of lower limb bone of chronic osteomyelitis with bone defect[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2018, 31(6): 556-561. Chinese with abstract in English.

(收稿日期: 2022-08-16 本文编辑: 朱嘉)