

· 临床论著 ·

体外冲击波治疗骨不连的方法选择与影响因素[△]胡帆^{1,2}, 闫君², 梁豪君², 贾海光², 李浩^{1,2}, 肖健^{1,2}, 王策², 李培^{3*}, 邢更彦^{1,2*}(1. 安徽医科大学第五临床医学院, 安徽合肥 230032; 2. 中国人民解放军总医院第三医学中心, 北京 100039;
3. 沈阳医学院附属中心医院, 辽宁沈阳 110024)

摘要: [目的] 研究不同体外冲击波疗法 (extracorporeal shock wave therapy, ESWT) 治疗深部、较深部及浅部骨不连的疗效, 并探讨其影响因素。[方法] 2011年11月—2022年9月采用 ESWT 治疗各类骨不连 87 例。深部骨不连选择聚焦式 ESWT (focused ESWT, fESWT), 浅部选择发散式 ESWT (radial ESWT, rESWT), 较深部选择聚焦式联合发散式 ESWT (f-rESWT)。观察骨折愈合情况, 同时分析影响愈合率的相关因素。[结果] 87 例患者在治疗期间均无不良事件发生。至末次随访时, 深部骨不连愈合 24 例, 愈合率 75.0%; 较深部愈合 36 例, 愈合率 78.3%; 浅部愈合 7 例, 愈合率 77.8%。按治疗方法, 三组间年龄、性别、骨不连分型、临床愈合时间和影像不同时间点愈合率的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。按末次随访时患者是否达到影像愈合分组, 愈合组的年龄显著小于不愈合组 [(34.3±10.5) 岁 vs (40.5±10.1) 岁, $P=0.042$], 而愈合组治疗次数显著多于不愈合组 [(22.6±9.8) 次 vs (8.3±3.6) 次, $P=0.011$], 两组在性别、骨不连类型及诊断距首次治疗间隔时间均无明显差异 ($P>0.05$)。多因素逻辑回归分析表明, 年龄是骨不连愈合的负面影响因素 ($OR=0.920, P=0.040$), 而 ESWT 治疗次数是骨不连愈合的正面影响因素 ($OR=1.125, P=0.004$)。[结论] 根据骨不连发生部位的深浅选择不同 ESWT 个性化治疗方法可获得满意疗效。治疗次数和年龄是 ESWT 治疗骨不连的重要影响因素。

关键词: 骨不连, 体外冲击波治疗, 骨不连愈合, 影响因素**中图分类号:** R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 18-1676-06

Method selection and impacting factors of extracorporeal shock wave therapy for fracture nonunion // HU Fan^{1,2}, YAN Jun², LIANG Hao-jun², JIA Hai-guang², LI Hao^{1,2}, XIAO Jian^{1,2}, WANG Ce², LI Pei³, XING Geng-yan^{1,2}. 1. The Fifth Clinical College, Anhui Medical University, Hefei 230032, China; 2. The Third Medical Center, General Hospital of PLA, Beijing 100039, China; 3. Central Hospital of Shenyang City, Shenyang Medical College, Shenyang 110024, China

Abstract: [Objective] To investigate the efficacy of different extracorporeal shock wave therapies (ESWTs) in the treatment of deep, relatively deep and superficial fracture nonunion, and explore relative impacting factors. **[Methods]** From November 2011 to September 2022, a total 87 patients received ESWTs, including focused ESWT (fESWT) used for deep fracture nonunion, fESWT combined with radial ESWT (rESWT), (f-rESWT) for relatively deeper nonunion, and rESWT for superficial nonunion. The fracture nonunion healing was observed and the related factors affecting the healing rate were analyzed. **[Results]** No adverse events occurred in 87 patients during treatment. At the last follow-up, the deep bone nonunion healed in 24 cases (75.0%), while relatively deeper nonunion healed in 36 cases (78.3%), and superficial nonunion healed in 7 cases (77.8%). There were no statistically significant differences in age, sex, bone nonunion type, clinical healing time and healing rate at different time points on images among the three groups based on treatment methods ($P>0.05$). According to whether the patients had achieved nonunion healed on images at the last follow-up, the healed group were significantly younger in age than the non-healed group [(34.3±10.5) years vs (40.5±10.1) years, $P=0.042$], the healed group got significantly more times of treatment than the non-healed group [(22.6±9.8) times vs (8.3±3.6) time, $P=0.011$], despite insignificant differences between the two groups in gender, type of bone nonunion and interval between diagnosis and first treatment ($P>0.05$). As results of multivariate logistic regression, the age was a negative factor for nonunion healing ($OR=0.920, P=0.040$), while the treatment times of ESWT was a positive factor for nonunion healing ($OR=1.125, P=0.004$). **[Conclusion]** The individualized ESWT based on depth of fracture nonunion site, does obtain satisfactory curative effect. Treatment times and age are important factors impacting ESWT treatment of fracture nonunion.

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.18.08

△基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:81873914;31971294);首都临床特色应用研究项目(编号:Z181100001718018);首都卫生发展科研重点专项项目(编号:2018-1-5021);国家中医药管理局项目(编号:201507001-06)

作者简介:胡帆,在读研究生,研究方向:运动医学、冲击波,(电话)15855136395,(电子信箱)2089262773@qq.com***通信作者:**邢更彦,(电话)13501384316,(电子信箱)xy1350138@163.com;李培,(电话)18002479900,(电子信箱)peili4421@gmail.com

Key words: nonunion of bone fracture, extracorporeal shock wave therapy, fracture nonunion healing influencing factors

近5%~30%骨折患者治疗后, 骨折不愈合, 发生骨不连^[1, 2]。由于时间滞后性, 骨不连的早期诊断较为困难, 无法及时干预以预防其发生, 因此也是临床上研究的相关重点与难点。目前治疗方式主要有骨移植、髓内钉动力化、更换内固定、外固定架固定术等, 但仍有10%~20%患者术后不愈合^[3-5], 且再次手术治疗效果差。因而非手术治疗方法被运用于临床。其中, 体外冲击波治疗(extracorporeal shock wave therapy, ESWT)利用冲击波特有的空化效应和边界效应, 应用于骨不连的治疗中, 临床骨不连愈合率可达到60%~90%^[6-9], 目前临床上治疗骨不连多采用聚焦式冲击波(focused ESWT, fESWT)。由于骨折发生部位距皮肤表面远近不一, 根据骨折周径距皮肤的距离可将骨不连发生部位简单分为深部、较深部及浅部: 深部骨不连, 骨质完全包裹于机体深处, 包括股骨及骨盆; 较深部骨不连, 骨折断端周径距皮肤表面深浅不一, 包括肱骨、胫腓骨、尺桡骨; 浅部则指大部分骨质处于浅表位置, 包括锁骨、腕舟骨、内外踝等。浅部骨不连发生时, 更为简洁, 易于操作的发散式冲击波(radial ESWT, rESWT)也具有良好治疗效果^[8]。同时rESWT的传播距离有限, 聚焦式联合发散式冲击波治疗较深部骨不连可能比单种波源冲击波具有更佳的治疗效果。本研究针对骨不连位置深、浅的部位选择个性化ESWT治疗, 收集了相关诊疗信息, 进行统计学分析, 评价不同波源冲击波治疗深部、较深部、浅部的有效性与安全性, 同时识别不同因素对疗效的作用, 为不同部位骨不连冲击波的选择提供基础。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准: (1) 年龄18~60岁; (2) 符合骨不连临床诊断标准, 手术或非手术干预后至少6个月后骨折断端无桥接骨痂生成, 无连续性皮质骨, 且3个月内影像学上无变化; (3) 创伤后6个月骨折部位仍无法负重活动。

排除标准: (1) 病理性骨折; (2) 感染性骨不连或萎缩性骨不连, 骨不连两端间隙>0.5 cm; (3) 凝血功能、免疫功能异常; (4) 慢性消耗性疾病, 如恶性肿瘤等。

1.2 一般资料

2011年11月—2022年9月共87例患者符合上述标准, 纳入本研究。其中, 男56例, 女31例, 平均年龄(35.3±14.4)岁, 深部部位32例, 均为股骨; 较深部47例, 包括肱骨10例, 胫腓骨18例, 尺桡骨19例; 浅表部位8例, 包括内、外踝各1例, 腕舟骨3例, 锁骨3例。首次治疗距诊断为不连接的时间为(450.9±269.7) d。

1.3 治疗方案

深部选择fESWT, 较深部位选择fESWT联合rESWT(f-r ESWT), 浅表部位选择rESWT。fESWT设备为惠康冲击波骨科治疗机HK.SWT-007; rESWT设备为EMS Swiss Dolor Clast® CLASSIC。

fESWT: 患者采取仰卧位或坐位, 用C形臂X线机透视定位, 使未愈合部位与冲击波第二焦点吻合; 治疗头贴紧皮肤, 以切线式耦合至骨不连两端边缘, 定位完成后在与冲击波探头接触的皮肤区域喷涂超声耦合剂。每次治疗能流密度为0.25~0.39 mJ/mm², 以患者能承受为宜适当增减, 频率为1 Hz, 环绕骨不连断端选择3~5个靶点治疗, 每点治疗500~800次, 共1 500~4 000次, 5~6次治疗为1个疗程, 每个疗程间隔1.5~2个月, 共3~5个疗程。

rESWT: 患者采取坐位, 通过X线或超声定位^[10], 超声下可见光滑的骨皮质中出现褶皱或中断, 在中断处体表进行标记, 定位完成后在与冲击波探头接触的皮肤区域喷涂超声耦合剂。每次治疗能量为3~5 bar, 以患者能承受为宜适当增减, 频率为8~10 Hz, 选择3~4个点治疗, 每点治疗600~800次, 共1 800~3 200次, 每个疗程间隔1.5~2个月, 共3~5个疗程。

f-r ESWT: 根据骨不连断端周径距皮肤距离, 浅于1.5 cm使用发散式冲击波, 深于1.5 cm使用聚焦式冲击波。fESWT能流密度为0.2~0.3 mJ/mm², 频率为1~2 Hz, 环绕骨不连断端选择3~5个点治疗, 每点治疗500~800次, 共1 500~4 000次。rESWT能量为3~4 bar, 频率为8~10 Hz, 环绕断端选择3~4个点, 每点500~600次, 共1 500~2 400次。5~6次治疗为1个疗程, 每个疗程间隔1.5~2个月, 共3~5个疗程。

治疗时应避开钢板、大血管及神经。在治疗过程中监测患者状况, 皮肤是否有损伤、患者疼痛状况等。

1.4 评价指标

记录患者临床资料，包括骨不连部位、骨折类型、骨不连类型、骨不连确诊至第1次冲击波治疗时间、冲击波治疗方案，患者治疗次数。按临床骨折愈合标准评价骨不连临床愈合时间。行影像检查，按骨折区域正位与侧位平片上骨折两端是否有新生骨评级如下^[11]：(1) 无效，前、后、内、外4个方向中只有1个方向上有新生皮质骨或无；(2) 部分愈合，4个方向有2个方向上有新生皮质骨；(3) 完全愈合，4个方向中至少有3个方向上有新生皮质骨。计算愈合率：骨折愈合率=(部分愈合患者+完全愈合患者)/全部患者)×100%。

1.5 统计学方法

采用SPSS 26软件进行统计分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用单因素方差分析，两两比较采用LSD法；资料呈非正态分布时，

采用秩和检验。计数资料采用卡方检验或Fisher精确检验。等级资料采用Kruskal-Wallis H检验。以骨不连是否愈合为因变量，其他因素为自变量，行多元逻辑回归分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 骨不连治疗结果的描述性分析

87例患者在治疗期间均无不良事件发生。经影像学评估(图1, 2)，ESWT治疗6个月后愈合58例，占比66.7%；治疗9个月后愈合64例，占比73.6%；治疗12个月后愈合67例，占比77.0%。深部骨不连愈合24例，愈合率75.0%；较深部愈合36例，愈合率78.3%；浅部愈合7例，愈合率77.8%。

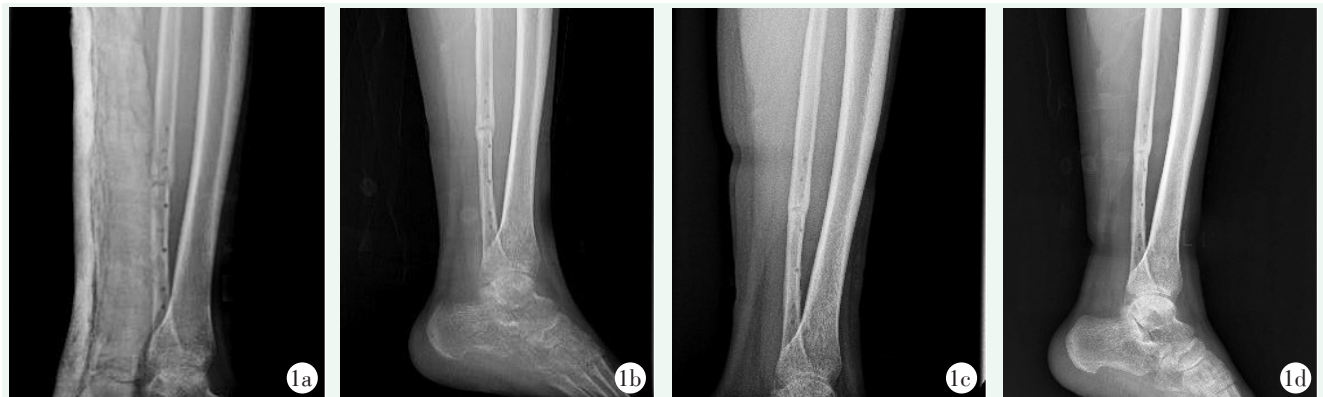


图1 患者，男，23岁，左腓骨骨折后骨不连8个月，使用聚焦式联合发散式冲击波治疗后，逐渐愈合。1a: 冲击波治疗前可见清晰骨折线；1b: 治疗后6个月骨折线模糊；1c: 治疗后9个月，出现骨性连接；1d: 治疗后12个月，骨折愈合塑形。
Figure 1. A 23-year-old male received fESWT combined with rESWT for fibular nonunion for 8 months, and gradually healed after treatment. 1a: Clear fracture line was visible before shockwave treatment, with significant separation at both ends of the fracture; 1b: The fracture line was blurry 6 months after treatment; 1c: The nonunion healed 9 months after treatment; 1d: The nonunion healed with bone remodeling 12 months after treatment.



图2 患者，男，57岁，股骨颈骨折后骨不连2个月，使用聚焦式冲击波治疗，骨不连仍无改善，后行人工髋关节置换术。2a: 冲击波治疗前；2b: 治疗后6个月；2c: 治疗后9个月；2d: 治疗后12个月，仍无改善。
Figure 2. A 57-year-old male who suffered from bone nonunion after femoral neck fracture for 2 months, then treated with fESWT without improvement in bone nonunion, finally underwent total hip arthroplasty. 2a: The X-ray before fESWT. 2b: The X-ray 6 months after fESWT. 2c: The X-ray 9 months after fESWT. 2d: The X-ray 12 months after treatment, no improvement in nonunion was noted.

2.2 分层单项因素比较

按治疗方法三组间各项资料比较见表 1。三组间

在年龄、性别、骨不连分型、临床愈合时间和影像不同时间点愈合率的差异均无统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 1 三种治疗方式单项因素比较

Table 1 Univariate comparison among the three treatments

指标	fESWT 组 (n=32)	f-r ESWT 组 (n=47)	rESWT 组 (n=8)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	35.1 \pm 12.2	36.5 \pm 10.2	38.3 \pm 11.2	0.266
性别 (例, 男/女)	21/11	36/11	4/4	0.247
分型 (例, 肥大/营养不良/缺损)	21/9/2	31/8/8	4/2/2	0.434
临床愈合时间 (月, $\bar{x} \pm s$)	5.2 \pm 1.0	5.0 \pm 0.6	5.9 \pm 2.0	0.651
影像愈合率 [例 (%)]				
治疗后 6 个月	22 (68.8)	30 (65.2)	6 (66.7)	0.480
治疗后 9 个月	23 (71.9)	34 (73.9)	7 (77.8)	0.882
治疗后 12 个月	24 (75.0)	36 (78.3)	7 (77.8)	0.581

按末次随访时患者是否达到影像愈合, 将患者分为两组, 两组间单项因素比较结果见表 2, 愈合组的年龄显著小于不愈合组 ($P < 0.05$), 而愈合组治疗次数显著多于不愈合组 ($P < 0.05$), 两组在性别、骨不连类型及诊断距首次治疗间隔时间均无明显差异 ($P > 0.05$)。

2.3 骨不连愈合的逻辑回归分析

以患者骨不连是否愈合为因变量, 其余因素归为自变量的多元逻辑回归分析结果见表 3, 患者骨不连愈合与诊断距首次冲击波治疗间隔时间和性别无关 ($P > 0.05$), 而患者年龄是骨不连愈合的负面影响因素 ($OR = 0.920, P = 0.040$), 而 ESWT 治疗次数是骨不连

愈合的正面影响因素 ($OR = 1.125, P = 0.004$)。

表 2 末次随访时是否愈合两组单因素分析比较

Table 2 Univariate comparison two groups whether healed at the last follow-up

指标	愈合组 (n=67)	不愈合 (n=20)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	34.3 \pm 10.5	40.5 \pm 10.1	0.042
性别 (例, 男/女)	38/24	18/7	0.345
分型 (例, 肥大/营养不良/缺损)	37/14/10	19/5/2	0.090
诊断距首次治疗时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	464.3 \pm 238.2	431.5 \pm 345.2	0.291
治疗次数 (次, $\bar{x} \pm s$)	22.6 \pm 9.8	8.3 \pm 3.6	0.011

表 3 骨不连是否愈合的逻辑回归结果

Table 3 Logistic regression outcome of whether nonunion healed

指标	B 值	标准误差	Wald 值	P 值	OR 值	95%CI	
						下限	上限
年龄	-0.083	0.040	4.208	0.040	0.920	0.850	0.996
间隔时间	0.000	0.002	0.028	0.866	1.000	0.996	1.003
治疗次数	0.118	0.041	8.186	0.004	1.125	1.038	1.219
性别 (1)	0.586	0.869	0.455	0.500	1.797	0.327	9.863

3 讨论

临床上骨不连的主要治疗方法是手术治疗, 但术后仍有较高概率不愈合^[12]。因而需要寻找一种新的治疗方法以提高治愈率。ESWT 已被公认是治疗骨不连的一种安全、有效的物理治疗手段。临床上常用的两种波源的冲击波各有特点: fESW 经反射后聚集在

一点或一段区域内, 使该区域能量较大, 冲击波输出能量在极短时间内就可达到峰值, 最大传播距离可达 10~15 cm; 而 rESW 的波发出后以发散的形式传播, 能量最大点位于探头前方, 能量越传播越衰减, 输出波形较为平稳, 使得平均能量强度高, 最远可传播 2~3 cm^[13]。已有研究表明, 冲击波作用效果具有能量依赖性, 中、低能量冲击波治疗骨不连效果微弱; 高能冲击波能破坏骨折端硬化骨质, 产生裂纹, 从而

增加局部血运,促进骨不连愈合^[14, 15],但高能冲击波对皮肤、肌肉组织有损伤。因此仅使用rESWT可能不是很好的选择。经研究报道,rESWT对于浅表部位骨不连也具有良好的治疗效果,愈合率可达60%~70%^[16]。因而,针对不同位置的骨不连选择不同类型的冲击波具有重要的临床意义。

由于冲击波在骨质中每传递1cm,能量会衰减50%^[17]。据此,以骨不连距皮肤表面远近将骨不连分为浅部、较深部及深部骨不连。在治疗浅表骨不连时,rESWT的能量最高处为其治疗头,可均匀地将能量传递至有效作用范围内,所以对于浅表部位骨不连是首选治疗方法^[18]。在本研究中,浅部患者使用rESWT愈合率达77.8%。而治疗较深处骨不连时,骨折断端部分处于较深部位,rESWT无法将能量传递至骨不连部位,而fESWT能量大,穿透性强,因此,选择聚焦式联合发散式冲击波对于较深部骨不连是一种合理、可行的方案。在本研究中,较深部患者使用f-rESWT愈合率可达78.26%。同时,深部骨不连单独使用fESWT愈合率可达75%。三种不同深浅的骨不连选择不同波源冲击波后愈合率无明显统计学差异,均可取得令人满意的疗效。

作者对影响ESWT治疗骨不连的各类因素进行分析,发现年龄、治疗次数与治疗效果具有相关性。Tian等^[19]报道高龄显著影响骨折的愈合,结合本研究表明,年龄是影响骨不连患者愈合的重要因素,年龄越大,治疗效果可能越差。学者提出治疗次数与治疗效果呈正相关^[20],在本研究中,ESWT治疗次数是骨不连愈合的正面因素。此外,本研究中,不同骨不连类型、第1次ESWT距骨折时间、性别对于ESWT的疗效均无显著性影响。Rupp等^[21, 22]曾提出骨不连的类型与治疗效果相关,肥厚型骨不连效果优于萎缩型^[23],研究者认为可能与骨折断端血供有关。在本研究中,ESW治疗不同类型骨不连未出现显著性差异。此外,Kuo等^[24]认为,从骨折到第1次ESWT治疗骨不连的时间与治疗效果相关,早期使用ESWT干预有利于骨不连的愈合,越早的冲击波治疗效果越佳。而在本研究中,未发现间隔时间与ESWT治疗骨不连的疗效有显著相关性。

综上所述,根据骨不连位置的深浅选择不同冲击波治疗方法均可达到预期治疗效果,冲击波治疗次数和患者年龄是冲击波治疗骨不连是否愈合和愈合效果的重要影响因素。

参考文献

- [1] Nicholson JA, Makaram N, Simpson A, et al. Fracture nonunion in long bones: A literature review of risk factors and surgical management [J]. *Injury*, 2021, 52 (Suppl 2): S3-S11. DOI: 10.1016/j.injury.2020.11.029.
- [2] 林冬冬, 隋明军, 迟涛胜, 等. 骨不连治疗最新研究进展 [J]. *中国中医药现代远程教育*, 2022, 20 (16): 206-208. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2779.2022.16.074.
Lin DD, Sui MJ, Chi TS, et al. The latest research progress of non-union treatment [J]. *Chin Med Mod Dist Educ Chin*, 2022, 20 (16): 206-208. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2779.2022.16.074.
- [3] Oh WT, Kang HJ, Chun YM, et al. Retrospective comparative outcomes analysis of arthroscopic versus open bone graft and fixation for unstable scaphoid nonunions [J]. *Arthroscopy*, 2018, 34 (10): 2810-2818. DOI: 10.1016/j.arthro.2018.04.024.
- [4] Quadlbauer S, Pezzeri C, Beer T, et al. Treatment of scaphoid waist nonunion by one, two headless compression screws or plate with or without additional extracorporeal shockwave therapy [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2019, 139 (2): 281-293. DOI: 10.1007/s00402-018-3087-6.
- [5] 王文, 左贵来, 王凡, 等. 新型桥接内固定系统术后股骨骨不连的治疗 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (6): 572-574. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.06.20.
Wang W, Zuo GL, Wang F, et al. Treatment of femoral nonunion after operation with new bridging internal fixation system [J]. *Orthop J Chin*, 2019, 27 (6): 572-574. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.06.20.
- [6] Dahm F, Feichtinger X, Vallant SM, et al. High-energy extracorporeal shockwave therapy in humeral delayed and non-unions [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2022, 48 (4): 3043-3049. DOI: 10.1007/s00068-021-01782-1.
- [7] Chow DH, Suen PK, Fu LH, et al. Extracorporeal shockwave therapy for treatment of delayed tendon-bone insertion healing in a rabbit model: a dose-response study [J]. *Am J Sports Med*, 2012, 40 (12): 2862-2871. DOI: 10.1177/0363546512461596.
- [8] Kertzman P, Csaszar NBM, Furia JP, et al. Radial extracorporeal shock wave therapy is efficient and safe in the treatment of fracture nonunions of superficial bones: A retrospective case series [J]. *J Orthop Surg Res*, 2017, 12 (1): 164. DOI: 10.1186/s13018-017-0667-z.
- [9] Stolberg-Stolberg J, Fuchs T, Lodde MF, et al. Addition of shock wave therapy to nail dynamization increases the chance of long-bone non-union healing [J]. *J Orthop Traumatol*, 2022, 23 (1): 4. DOI: 10.1186/s10195-021-00620-9.
- [10] 孙丽, 张纳, 屠宏亮, 等. 肌肉骨骼超声在长管状骨骨折骨不连冲击波治疗中的应用价值 [J]. *中华医学超声杂志 (电子版)*, 2019, 16 (11): 827-831. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2019.11.006.
Sun L, Zhang N, Tu HL, et al. Value of musculoskeletal ultrasound in shock wave therapy of long tubular bone fracture nonunions [J]. *Chin J Med Ultrasound (Electronic Edition)*, 2019, 16 (11): 827-31. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2019.11.006.

- [11] McClelland D, Thomas PB, Bancroft G, et al. Fracture healing assessment comparing stiffness measurements using radiographs [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2007, 457: 214–219. DOI: 10.1097/BLO.0b013e31802f80a8.
- [12] Tzioupis C, Giannoudis PV. Prevalence of long-bone non-unions [J]. *Injury*, 2007, 38 (Suppl 2): S3–S9. DOI: 10.1016/s0020-1383(07)80003-9.
- [13] 邢更彦, 张浩冲, 刘水涛, 等. 中国骨肌疾病体外冲击波疗法指南(2019年版) [J]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2019, 11 (4): 1–10, 16. DOI: 10.12037/YXQY.2019.04-01.
Xing GY, Zhang HC, Liu ST, et al. The Chinese Guidelines For Extracorporeal Shock Wave Therapy For Musculoskeletal Diseases (2019 edition) [J]. *Chin J Front Med Sci (Electronic Version)*, 2019, 11 (4): 1–10, 16. DOI: 10.12037/YXQY.2019.04-01.
- [14] Schaden W, Mittermayr R, Haffner N, et al. Extracorporeal shock-wave therapy (ESWT) – First choice treatment of fracture non-unions [J]. *Int J Surg*, 2015, 24 (Pt B): 179–183. DOI: 10.1016/j.ijssu.2015.10.003.
- [15] Wang CJ, Huang KE, Sun YC, et al. VEGF modulates angiogenesis and osteogenesis in shockwave-promoted fracture healing in rabbits [J]. *J Surg Res*, 2011, 171 (1): 114–119. DOI: 10.1016/j.jss.2010.01.045.
- [16] 赵子星, 杜贵忠, 余金胜, 等. 发散式体外冲击波治疗长骨骨不连的相关因素 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (10): 893–897. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.10.06.
Zhao ZX, Du GZ, Yu JS, et al. Factors related to outcomes of radial extracorporeal shock wave for long-bone nonunion [J]. *Orthop J Chin*, 2022, 30 (10): 893–897. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.10.06.
- [17] Hausdorf J, Lutz A, Mayer-Wagner S, et al. Shock wave therapy for femoral head necrosis: Pressure measurements inside the femoral head [J]. *J Biomech*, 2010, 43 (11): 2065–2069. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2010.04.009.
- [18] Yue L, Chen H, Feng TH, et al. Low-intensity extracorporeal shock wave therapy for midshaft clavicular delayed union: A case report and review of literature [J]. *World J Clin Cases*, 2021, 9 (27): 8242–8248. DOI: 10.12998/wjcc.v9.i27.8242.
- [19] Tian R, Zheng F, Zhao W, et al. Prevalence and influencing factors of nonunion in patients with tibial fracture: systematic review and meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15 (1): 377. DOI: 10.1186/s13018-020-01904-2.
- [20] Gerdesmeyer L, Maier M, Haake M, et al. Physical-technical principles of extracorporeal shockwave therapy (ESWT) [J]. *Orthopade*, 2002, 31 (7): 610–617. DOI: 10.1007/s00132-002-0319-8.
- [21] Rupp M, Biehl C, Budak M, et al. Diaphyseal long bone non-unions – types, aetiology, economics, and treatment recommendations [J]. *Int Orthop*, 2018, 42 (2): 247–258. DOI: 10.1007/s00264-017-3734-5.
- [22] 杜全红, 谷燕燕, 于文海, 等. 张-压应力刺激治疗四肢长骨萎缩性骨不连 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (14): 1323–1326. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.14.17.
Du QH, Gu YY, Yu WH, et al. Tension-compression stress stimulation by external fixation frame for atrophic nonunion of long bones in extremities [J]. *Orthop J Chin*, 2021, 29 (14): 1323–1326. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.14.17.
- [23] Xu ZH, Jiang Q, Chen DY, et al. Extracorporeal shock wave treatment in nonunions of long bone fractures [J]. *Int Orthop*, 2009, 33 (3): 789–793. DOI: 10.1007/s00264-008-0553-8.
- [24] Kuo SJ, Su IC, Wang CJ, et al. Extracorporeal shockwave therapy (ESWT) in the treatment of atrophic non-unions of femoral shaft fractures [J]. *Int J Surg*, 2015, 24 (Pt B): 131–134. DOI: 10.1016/j.ijssu.2015.06.075.

(收稿:2023-03-29 修回:2023-08-16)

(同行评议专家: 宋一平)

(本文编辑: 郭秀婷)