

# 体外冲击波碎石术在泌尿系结石治疗中的研究进展

李二强<sup>1,2</sup>, 张贺林<sup>1,2</sup>, 王 博<sup>1,2</sup>, 徐 鹏<sup>1,2</sup>, 黄贤德<sup>1,2</sup>, 郭利君<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>甘肃中医药大学第一临床医学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>甘肃省人民医院泌尿外科, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年3月11日; 录用日期: 2023年4月7日; 发布日期: 2023年4月14日

## 摘 要

体外冲击波碎石术(extracorporeal shock wave lithotripsy, ESWL)是临床上泌尿外科常用的治疗泌尿系结石的方法, 由于其操作简便、定位准确、创伤性及并发症少等优点, ESWL成为临床上治疗泌尿系结石的主要方法之一。但是ESWL的治疗效果受到很多因素的影响, 而且一些新兴技术的出现也为临床治疗起到了指导作用, 文章综述了目前研究所认识到的影响因素和最新的研究进展。

## 关键词

体外冲击波碎石术, 影响因素, 疗效

# Research Progress of Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy in the Treatment of Urinary Stones

Erqiang Li<sup>1,2</sup>, Helin Zhang<sup>1,2</sup>, Bo Wang<sup>1,2</sup>, Peng Xu<sup>1,2</sup>, Xiande Huang<sup>1,2</sup>, Lijun Guo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>The First School of Clinical Medicine, Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Department of Urology, Gansu Provincial People's Hospital, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 7<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 14<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) is a commonly used method in urology to treat urinary stones, and ESWL has become one of the main methods for the treatment of urinary stones

\*通讯作者。

文章引用: 李二强, 张贺林, 王博, 徐鹏, 黄贤德, 郭利君. 体外冲击波碎石术在泌尿系结石治疗中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2023, 13(4): 5594-5600. DOI: 10.12677/acm.2023.134790

due to its advantages of simple operation, accurate positioning, trauma and few complications. However, the therapeutic effect of ESWL is affected by many factors, and the emergence of some emerging technologies has also played a guiding role in clinical treatment.

## Keywords

Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy, Influencing Factors, Efficacy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

泌尿系结石是泌尿外科的常见病、多发病。随着人们生活习惯及饮食结构的改变,发病率逐年上升,而应对不同部位及不同大小的结石,泌尿外科也有不同的治疗方案。该疾病发病时患者出现排尿困难、血尿以及疼痛等临床症状,可能伴随尿频尿急等情况,对患者的正常生活和身心健康造成不良影响。随着医疗技术的发展,临床治疗该疾病的方式较多,最常见的即体外冲击波碎石(Extracorporeal shock wave lithotripsy, ESWL)和钬激光碎石术[1] [2]。由于其有效性和较低的并发症,ESWL很快被美国食品和药物管理局(FDA)批准用于临床。在EAU和AUA指南中,体外冲击波碎石术是一种非侵入性治疗方法,被推荐作为治疗小于2 cm的肾脏结石和输尿管近端结石的首选方法。在十年内,它成为肾或输尿管结石患者最常见的治疗措施。过去30年中,ESWL技术作为泌尿系结石的治疗方案在有效性方面还是有一定的争议,因此,研究人员一直致力于以更好地优化结果并降低再治疗率。ESWL的成功率受许多因素的影响,如结石的大小、位置、成分、泌尿系统解剖、体重指数(Body Mass Index, BMI)、皮肤至结石的距离(Skin Stone Distance, SSD) [3] [4] [5]。基于上述原因,许多研究已经开始了解如何使ESWL更有效、更安全。本文讨论了可能影响ESWL结果的一些参数,并对一些新技术和新概念进行概述。

## 2. 影响因素

### 2.1. 体重指数(BMI)和皮肤到结石的距离(SSD)

肥胖会影响ESWL的治疗效果。当冲击波能量传播到体内结石表面时,多余的脂肪组织会减弱冲击波的能量。已有研究报告也证实,BMI是ESWL术后无石症预后的显著影响因素。当前肥胖患者的增加,使得定位及成像困难,在严重的情况下,皮肤到结石距离可以超过碎石器的焦距。皮肤到结石距离小于10~11 cm被证明是ESWL后SFR的独立预测因素[6] [7]。同样,体重指数与SFR呈负相关,在治疗肥胖患者时要考虑的另一因素是,皮肤到结石距离与术后血肿风险增加也有关。

### 2.2. 结石位置与结石大小

结石位置是ESWL结果的其中一个预测指标。下盏(Lower calyceal, LC)结石虽然也可以通过ESWL治疗,但是由于下盏的解剖特点以及LC漏斗的宽度和长度,导致SWL后碎片的清除率降低。Prahara Yuri等人[8]在一项针对肾下盏结石的荟萃分析结果表明,纳入958例中,其中体外冲击波碎石术513例、经皮肾镜碎石术271例和输尿管软镜174例,术后3个月结石排出率为90.8%、75.3%和64.7%。另一项前瞻性、多中心、随机对照试验[9],比较了输尿管镜与ESWL对小于1 cm的下盏结石的疗效。实验结果

表明,这两种技术在有效性方面没有统计学上的显著差异。尽管 ESWL 对于肾下盏结石有一定的疗效,但是对于下盏结石而言,相比于其他两种治疗方案,仍显得不足。EAU 和 AUA 指南也提出不建议将 ESWL 作为尺寸大于 2 cm 的肾结石的主要治疗方法[10],最好使用替代方法,如经皮肾镜取石术(Percutaneous nephrolithotomy, PCNL)。

### 2.3. 结石密度

影响 ESWL 的另一个重要因素是结石自身的硬度及密度,目前临床上普遍使用平扫 CT 作为一个重要依据,由 CT 值反映结石的密度。研究表明,随着 CT 值的增加,ESWL 的成功率降低,而且 CT 值是影响 ESWL 的独立影响因素[11] [12] [13]。尽管 CT 值在 ESWL 中的预测作用得到了大家的认可,但是在具体的截断值上仍旧没有一个统一的标准。在一项前瞻性临床试验中,研究认为 CT 值和 SFR 之间呈线性关系,密度小于 970 HU 的结石 ESWL 的治疗成功率更高[14]。而且 Gupta 等人发现[15],通过 HU 预测 SWL 的结石清除率比单独通过结石大小来预测要更加准确。大量研究报告已经证明了冲击波碎石术的最终结果与结石密度之间存在密切联系,并进一步证实了 CT 值的重要作用,而且 CT 值作为直观的 ESWL 治疗前的一个预测指标,美国泌尿外科协会和欧洲泌尿外科协会对冲击波碎石手术患者的选择也提出了具体的建议,其中就包括结石密度,指南指出结石 CT 值 < 900~1000 Hu 可以预测 ESWL 的成功[16]。最近,研究人员提出了一种新的 SWL 结果预测指标:结石密度变异系数(VCS D)。VCS D = (结石密度标准差)/(平均结石密度) \* 100 [17]。与 HU 值相比,它是 SWL 治疗效果的更强预测指标,这可能是因为它比简单的 HU 密度平均值更好地解释了结石的成分和晶体差异。

### 2.4. 冲击波频率和次数

使用最佳的冲击频率可以提高结石破碎率并减少组织损伤。试验表明,降低冲击波频率可以促进结石破碎,尤其是对于大于 1 cm 的结石[18]。但是冲击频率减慢会导致治疗时间延长,而最佳治疗频率尚不清楚。另外一项针对儿童肾结石行 ESWL 治疗的研究表明,采用低频率 60 次/min 和 90 次/min 在疗效方面是没有差异的,但是此次研究他们的人群是儿童,故为了降低肾脏的影响,提倡采用低频率 60 次/min 是比较有利的。与 120 次冲击/分钟相比,60 至 90 次冲击/分钟的 ESWL 会使结石更容易碎裂(尤其是对于较大的石头)。一项 Meta 分析出低频率(60~70 次/min)和中频率(80~90 次/min)碎石的 SFR 结果相当,但明显高于高频率(100~120 次/min)的 SFR [19]。现有的研究证明在 ESWL 上,采用低频率冲击波不仅不会影响 ESWL 的疗效,而且还会有效的降低对组织器官的损伤,减少并发症的出现。

关于单次 ESWL 治疗次数目前没有明确规定,但多数专家共识认为肾结石单次治疗不应该超过 2000 次,而输尿管结石单次治疗则不应超过 3000 次[20]。一项关于单次 ESWL 治疗次数研究表明,他们通过使用相同频率(120 次/min)情况下治疗肾结石及输尿管结石,对照组为 3500 次,观察组为 7000 次,观察组清石率为 87.7%,而对照组仅为 75%,随后的数据分析提示观察组无论是碎石平均能量还是总能量均明显高于常规组,比较两组并发症差异无统计学意义,证明增加冲击波次数也同时提高了碎石效率,从而提高 ESWL 的无石率[21]。但是随着冲击波次数的增加,在结石碎裂效果增加的同时对肾脏及器官的损伤也在同步增加,具体影响可能与碎石机的型号也有关系。但是对于肥胖患者而言在尽量不影响肾脏的情况下,增加碎石次数也是可以考虑的。

### 2.5. 耦合

患者与水囊的充分耦合是能量最大化传输的关键。通过耦合剂将水囊与患者碎石部位以气密的方式接触,将耦合介质中的气泡降至最低,可以实现向结石输送的最大能量。EAU 指南认为,为了使冲击波

能量能够有效从碎石机传导至体内结石，在患者皮肤与水囊之间使用适当的耦合剂对于碎石的效率是至关重要的，而且在碎石治疗开始前应选用优质的耦合剂并将水囊表面气泡彻底排净，确保碎石部位皮肤与水囊贴合紧密，使冲击波能够有效传导，并且能有效减少能量损失[22]。Pishchalnikov 等人[23]的研究观察发现在碎石过程中，水囊与碎石部位皮肤间会出现气泡，而且当气泡范围为耦合表面积的 1.5%~19% 时，会使冲击波振幅平均降低 20%。此外，如果患者在治疗过程中进行重新更换体位定位的话，能量可进一步降低 57%。Guangyan Li 等人[24]的一项研究表明，当耦合区域面积降低 18% 时，结石的碎石效率下降接近 30%。为了尝试减少这种干扰，Cartledge 等人[25]进行了一项体外研究，比较了五种耦合剂：凡士林、超声波凝胶、局部麻醉剂乳膏的混合物、利多卡因凝胶和市售水溶性润滑凝胶。他们发现，水溶性润滑凝胶碎石所需要的冲击波次数最少，凡士林最多。耦合是 ESWL 的一个重要方面，必须注意使用适当的传输介质，减少患者移动和重新定位，并确保冲击波路径中没有空气。

## 2.6. 定位

正确的患者定位和结石靶向是优化 ESWL 成功的关键。由于冲击波会受到骨骼等组织结构的阻碍，因此定位显得尤为重要。有研究认为，改良仰卧位治疗可以解决输尿管上段结石，而输尿管中段结石最好在俯卧位治疗[26]。一项多中心回顾性研究表明仰卧位经臀肌体位与标准仰卧位相比，治疗输尿管下段 0.5~2.0 cm 结石，具有更高的成功率[27]。也有研究证明[28]仰卧位经臀位入路不仅可以更有效定位结石，而且经臀位 ESWL 治疗输尿管远端结石的效率显著高于俯卧位，在成功率方面与输尿管镜治疗相似。也有研究提出关于 X 线定位或超声定位的优越性，目前 X 线定位和超声定位是最常用的两种定位方式，这两种技术都适用于 ESWL。但是两种方式也是各有优缺点。虽然 X 线在临床上更为广泛的应用也可方便地定位结石，但操作者和患者会受到辐射影响[29]。超声定位可减少辐射影响，而且超声可识别 X 线无法观察的透明结石，并且超声可以实时监测结石碎裂情况。Besien 等[30]人随机分配了 114 名患者，使用超声和 X 线透视进行结石定位，超声引导组的 SFR 为 52%，X 线引导组 SFR 为 42%，结果没有显著差异，Smith 等人[31]的一项回顾性队列研究中也观察到了相似的结果，进一步证明 SFR 无差异。

## 3. 新技术和新概念

### 3.1. 超声推进技术

超声推进是一种新型的技术，它利用短时间的聚焦超声脉冲在肾脏和输尿管上重新定位结石，它能产生实时的超声波图像，并将超声波引导到结石部位，从而可以更加快捷方便的重新定位。超声波推进技术是在华盛顿大学进行了开发和测试，并于 2010 年首次实验。Shah 等人[32]发表了利用超声波推进技术在模拟肾脏的假体中进行实验，在实验中，通过超声成像来定位结石，并通过短脉冲聚焦超声来重新定位结石，研究此项技术重新定位结石的可行性。

Jonathan D Harper 等人[33]报告了使用第二代超声波推进技术的研究，并进行了动物实验，26 颗结石均在治疗过程中转移，没有研究动物出现并发症，包括肉眼血尿，并且没有组织学损伤。该研究团队取得美国食品药品监督管理局批准后，研究报告了超声推进在排出小结石和移除阻塞性大结石方面的首次人体研究试验结果[34]，15 例研究参与者中有 14 例成功复位肾结石，成功移动的最大结石为 10 mm，未发生与治疗相关的不良事件。无论是 ESWL 还是 PCNL 治疗泌尿系结石，最终的目标都是成功的将结石排出，基于此，研究人员建议这些治疗方法中的任何一种都可以在超声推进后进行，以促进更高的结石清除率。而且另一种潜在用途是在 ESWL 治疗前或治疗中重新定位结石，从而以提高结石的碎石率和清除率，对于儿童、孕妇、活动不便和有急性结石事件职业风险的人群，也将从超声推进技术中获得很大益处。



### 3.2. 爆裂波碎石术(Burst Wave Lithotripsy, BWL)

BWL 是一种新的技术模式, 可经皮输送聚焦正弦超声脉冲波。这种紧凑型手持式探头(SC-X 探头)依靠超声引导以高速率输送低峰值冲击波, 最大限度地减少空化气泡形成, 以提高碎石效率; 现有的体外研究实验数据表明, BWL 在治疗泌尿系结石和人造结石时在碎石功效和效率都有着显著的优势, 其较高的超声频率使得结石碎片更细小也更容易排出体外[35] [36]。最近, 研究人员设计了具有更大波束宽度的 BWL 系统, 以针对更大的结石。可有效破碎结石, 最大 12 mm, 比现有 BWL 系统效率高 2.8 倍[37]。在一项动物实验研究中, 10 只动物使用 BWL 持续 30 分钟实验, 治疗后肾脏和周围组织无显著组织学变化, 血液化学、尿液值或动物行为无异常[38]。另外两项关于 BWL 的动物实验也初步证明了此项技术的安全性和有效性[39] [40], 在实验后行 MRI、组织学检查显示肾实质没有损伤。目前此项技术只在动物身上实验, 而 BWL 在人体中的临床试验已经得到了食品和药物管理局的批准, 相信更多的研究和数据关于 BWL 在临床中的应用也会越来越充分。

## 4. 结论

ESWL 虽然是一种无创的治疗方案, 具有恢复时间快, 并发症风险低的优点, SWL 为结石患者提供了一个很好的选择, 但是有关 ESWL 的影响因素也不能忽视, 因此, 通过优化参数如何使 ESWL 变得更高效率、更安全是尤为重要的。操作者的经验对成功也是必不可少的。新概念、新技术和未来的研究正在引领 ESWL 走向更光明的未来。

## 参考文献

- [1] 彭金奎. 钬激光碎石术与体外冲击波碎石术治疗输尿管结石的效果比较[J]. 中国继续医学教育, 2021, 13(14): 140-143.
- [2] 高景宇, 王兴存, 徐学军, 等. 输尿管软镜钬激光碎石术与体外冲击波碎石术治疗输尿管结石疗效比较[J]. 现代中西医结合杂志, 2020, 29(19): 2098-2102.
- [3] 郭吉军, 熊大波. 影响输尿管结石患者体外冲击波碎石术疗效的因素分析[J]. 临床医学研究与实践, 2022, 7(20): 50-53.
- [4] 刘磊, 王阳, 胡跃世, 等. 早期体外冲击波碎石术治疗输尿管结石的疗效及影响因素分析[J]. 中国临床医生杂志, 2021, 49(5): 581-584.
- [5] 曾新红, 苏永祥, 刘左成, 等. 泌尿系结石体外冲击波碎石术影响因素分析[J]. 深圳中西医结合杂志, 2018, 28(15): 108-110.
- [6] Park, H.S., Gong, M.K., Yoon, C.Y., *et al.* (2016) Computed Tomography-Based Novel Prediction Model for the Outcome of Shockwave Lithotripsy in Proximal Ureteral Stones. *Journal of Endourology*, **30**, 810-816. <https://doi.org/10.1089/end.2016.0056>
- [7] Müllhaupt, G., Engeler, D.S., Schmid, H.P., *et al.* (2015) How Do Stone Attenuation and Skin-to-Stone Distance in Computed Tomography Influence the Performance of Shock Wave Lithotripsy in Ureteral Stone Disease? *BMC Urology*, **15**, 72. <https://doi.org/10.1186/s12894-015-0069-7>
- [8] Yuri, P., Hariwibowo, R., Soeroharjo, I., *et al.* (2018) Meta-Analysis of Optimal Management of Lower Pole Stone of 10-20 mm: Flexible Ureteroscopy (FURS) versus Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy (ESWL) versus Percutaneous Nephrolithotomy (PCNL). *Acta Medica Indonesiana*, **50**, 18-25.
- [9] Pearle, M.S., Lingeman, J.E., Leveillee, R., *et al.* (2008) Prospective Randomized Trial Comparing Shock Wave Lithotripsy and Ureteroscopy for Lower Pole Caliceal Calculi 1 cm or Less. *Journal of Urology*, **179**, S69-S73. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2008.03.140>
- [10] Hughes, T., Ho, H.C., Pietropaolo, A., *et al.* (2020) Guideline of Guidelines for Kidney and Bladder Stones. *Turkish Journal of Urology*, **46**, S104-s112. <https://doi.org/10.5152/tud.2020.20315>
- [11] Keskin, S.K., Spencer, M., Lovegrove, C., *et al.* (2022) The New Lithotripsy Index Predicts Success of Shock Wave Lithotripsy. *World Journal of Urology*, **40**, 3049-3053. <https://doi.org/10.1007/s00345-022-04215-9>
- [12] Yoshioka, T., Ikenoue, T., Hashimoto, H., *et al.* (2020) Development and Validation of a Prediction Model for Failed

- Shockwave Lithotripsy of Upper Urinary Tract Calculi Using Computed Tomography Information: The S(3)HoCKwave Score. *World Journal of Urology*, **38**, 3267-3273. <https://doi.org/10.1007/s00345-020-03125-y>
- [13] Xun, Y., Li, J., Geng, Y., *et al.* (2018) Single Extracorporeal Shock-Wave Lithotripsy for Proximal Ureter Stones: Can CT Texture Analysis Technique Help Predict the Therapeutic Effect? *European Journal of Radiology*, **107**, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.08.018>
- [14] Ouzaid, I., Al-Qahtani, S., Dominique, S., *et al.* (2012) A 970 Hounsfield Units (HU) Threshold of Kidney Stone Density on Non-Contrast Computed Tomography (NCCT) Improves Patients' Selection for Extracorporeal Shockwave Lithotripsy (ESWL): Evidence from a Prospective Study. *BJU International*, **110**, E438-E442. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2012.10964.x>
- [15] Gupta, N.P., Ansari, M.S., Kesarvani, P., *et al.* (2005) Role of Computed Tomography with No Contrast Medium Enhancement in Predicting the Outcome of Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy for Urinary Calculi. *BJU International*, **95**, 1285-1288. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2005.05520.x>
- [16] Jiang, P., Xie, L., Arada, R., *et al.* (2021) Qualitative Review of Clinical Guidelines for Medical and Surgical Management of Urolithiasis: Consensus and Controversy 2020. *Journal of Urology*, **205**, 999-1008. <https://doi.org/10.1097/JU.0000000000001478>
- [17] Yamashita, S., Kohjimoto, Y., Iguchi, T., *et al.* (2017) Variation Coefficient of Stone Density: A Novel Predictor of the Outcome of Extracorporeal Shockwave Lithotripsy. *Journal of Endourology*, **31**, 384-390. <https://doi.org/10.1089/end.2016.0719>
- [18] Yilmaz, E., Batislam, E., Basar, M., *et al.* (2005) Optimal Frequency in Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy: Prospective Randomized Study. *Urology*, **66**, 1160-1164. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2005.06.111>
- [19] Kang, D.H., Cho, K.S., Ham, W.S., *et al.* (2016) Comparison of High, Intermediate, and Low Frequency Shock Wave Lithotripsy for Urinary Tract Stone Disease: Systematic Review and Network Meta-Analysis. *PLOS ONE*, **11**, e0158661. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158661>
- [20] 陈军, 陈兴发, 谷现恩, 等. 体外冲击波碎石治疗上尿路结石安全共识[J]. 现代泌尿外科杂志, 2018, 23(8): 574-579.
- [21] López-Acón, J.D., Budía Alba, A., Bahílo-Mateu, P., *et al.* (2017) Analysis of the Efficacy and Safety of Increasing the Energy Dose Applied Per Session by Increasing the Number of Shock Waves in Extracorporeal Lithotripsy: A Prospective and Comparative Study. *Journal of Endourology*, **31**, 1289-1294. <https://doi.org/10.1089/end.2017.0261>
- [22] Türk, C., Petřík, A., Sarica, K., *et al.* (2016) EAU Guidelines on Interventional Treatment for Urolithiasis. *European Urology*, **69**, 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2015.07.041>
- [23] Pishchalnikov, Y.A., Neucks, J.S., Vonderhaar, R.J., *et al.* (2006) Air Pockets Trapped during Routine Coupling in Dry Head Lithotripsy Can Significantly Decrease the Delivery of Shock Wave Energy. *Journal of Urology*, **176**, 2706-2710. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2006.07.149>
- [24] Li, G., Williams, J.C., Pishchalnikov, Y.A., *et al.* (2012) Size and Location of Defects at the Coupling Interface Affect Lithotripter Performance. *BJU International*, **110**, E871-E877. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2012.11382.x>
- [25] Cartledge, J.J., Cross, W.R., Lloyd, S.N., *et al.* (2001) The Efficacy of a Range of Contact Media as Coupling Agents in Extracorporeal Shockwave Lithotripsy. *BJU International*, **88**, 321-324. <https://doi.org/10.1046/j.1464-410X.2001.02289.x>
- [26] Tiselius, H.G. (2008) How Efficient Is Extracorporeal Shockwave Lithotripsy with Modern Lithotripters for Removal of Ureteral Stones? *Journal of Endourology*, **22**, 249-255. <https://doi.org/10.1089/end.2007.0225>
- [27] Choo, M.S., Han, J.H., Kim, J.K., *et al.* (2018) The Transgluteal Approach to Shockwave Lithotripsy to Treat Distal Ureter Stones: A Prospective, Randomized, and Multicenter Study. *World Journal of Urology*, **36**, 1299-1306. <https://doi.org/10.1007/s00345-018-2244-4>
- [28] Phipps, S., Stephenson, C. and Tolley, D. (2013) Extracorporeal Shockwave Lithotripsy to Distal Ureteric Stones: The Transgluteal Approach Significantly Increases Stone-Free Rates. *BJU International*, **112**, E129-E133. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2012.11738.x>
- [29] Karlin, G., Marino, C., Badlani, G., *et al.* (1990) Benefits of an Ultrasound-Guided ESWL Unit. *Archivos Espanoles de Urologia*, **43**, 579-581.
- [30] Van Besien, J., Uvin, P., Hermie, I., *et al.* (2017) Ultrasonography Is Not Inferior to Fluoroscopy to Guide Extracorporeal Shock Waves during Treatment of Renal and Upper Ureteric Calculi: A Randomized Prospective Study. *BioMed Research International*, **2017**, Article ID: 7802672. <https://doi.org/10.1155/2017/7802672>
- [31] Smith, H.E., Bryant, D.A., Koong, J., *et al.* (2016) Extracorporeal Shockwave Lithotripsy without Radiation: Ultrasound Localization Is as Effective As Fluoroscopy. *Urology Annals*, **8**, 454-457. <https://doi.org/10.4103/0974-7796.192104>

- 
- [32] Shah, A., Owen, N.R., Lu, W., *et al.* (2010) Novel Ultrasound Method to Reposition Kidney Stones. *Urological Research*, **38**, 491-495. <https://doi.org/10.1007/s00240-010-0319-9>
- [33] Harper, J.D., Sorensen, M.D., Cunitz, B.W., *et al.* (2013) Focused Ultrasound to Expel Calculi from the Kidney: Safety and Efficacy of a Clinical Prototype Device. *Journal of Urology*, **190**, 1090-1095. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2013.03.120>
- [34] Harper, J.D., Cunitz, B.W., Dunmire, B., *et al.* (2016) First in Human Clinical Trial of Ultrasonic Propulsion of Kidney Stones. *Journal of Urology*, **195**, 956-964. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2015.10.131>
- [35] Maxwell, A.D., Cunitz, B.W., Kreider, W., *et al.* (2015) Fragmentation of Urinary Calculi *in Vitro* by Burst Wave Lithotripsy. *Journal of Urology*, **193**, 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2014.08.009>
- [36] Ramesh, S., Chen, T.T., Maxwell, A.D., *et al.* (2020) *In Vitro* Evaluation of Urinary Stone Comminution with a Clinical Burst Wave Lithotripsy System. *Journal of Endourology*, **34**, 1167-1173. <https://doi.org/10.1089/end.2019.0873>
- [37] Randad, A., Ghanem, M.A., Bailey, M.R., *et al.* (2020) Design, Fabrication, and Characterization of Broad Beam Transducers for Fragmenting Large Renal Calculi with Burst Wave Lithotripsy. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **148**, 44. <https://doi.org/10.1121/10.0001512>
- [38] Maxwell, A.D., Wang, Y.N., Kreider, W., *et al.* (2019) Evaluation of Renal Stone Comminution and Injury by Burst Wave Lithotripsy in a Pig Model. *Journal of Endourology*, **33**, 787-792. <https://doi.org/10.1089/end.2018.0886>
- [39] Bailey, M.R., Wang, Y.N., Kreider, W., *et al.* (2018) Update on Clinical Trials of Kidney Stone Repositioning and Preclinical Results of Stone Breaking with One System. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, **35**, Article ID: 020004. <https://doi.org/10.1121/2.0000949>
- [40] May, P.C., Kreider, W., Maxwell, A.D., *et al.* (2017) Detection and Evaluation of Renal Injury in Burst Wave Lithotripsy Using Ultrasound and Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Endourology*, **31**, 786-792. <https://doi.org/10.1089/end.2017.0202>