

Current Status and Trend of Holmium Laser and Ultrasonic Combined Lithotripsy

Xinyu Cao, Yuanhua Yu*, Chunying Pang

School of Life Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin
Email: *1281957328@qq.com

Received: May 22nd, 2017; accepted: Jun. 9th, 2017; published: Jun. 12th, 2017

Abstract

Stones can cause luminal obstruction, affect the affected organs or liquid discharge, resulting in pain, bleeding or secondary infection and other symptoms. Therefore, how to achieve the purpose of efficient lithotripsy at the same time to minimize the physical damage of postoperative patients is an urgent problem to be solved. Firstly, the early lithotripsy technology was reviewed in this article. Secondly, as the development of science and technology, medical equipment promotes the continuous progress of medical level; their respective clinical applications of holmium laser lithotripsy and ultrasonic lithotripsy were analyzed on the terms of holmium laser, ultrasonic transducer. Finally, the key technologies and new development of holmium laser and ultrasonic combined lithotripsy were reviewed in detail; possible directions in future were discussed as well.

Keywords

Holmium Laser, Electro-Optical Q-Switched Technology, Ultrasonic Lithotripsy, DDS

钬激光与超声联合碎石现状及发展趋势

曹欣雨, 于源华*, 庞春颖

长春理工大学生命科学技术学院, 吉林 长春
Email: *1281957328@qq.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月9日; 发布日期: 2017年6月12日

摘 要

结石可造成管腔梗阻, 影响受累器官或液体的排出, 产生疼痛, 出血或继发性感染等症状, 如何在达到

*通讯作者。

高效碎石目的的同时将术后患者身体损伤降至最小是一个亟待解决的问题。本文首先回顾了早期碎石技术。其次,由于科学技术,医学仪器的发展推动着医疗水平的不断进步,故分析了在钬激光器,超声换能器等方面,钬激光碎石,超声碎石各自的临床应用。最后,对于钬激光与超声联合碎石的关键技术,新的进展进行了比较详细的阐述并探讨在该领域下一步可能的研究方向。

关键词

钬激光器, 电光调Q技术, 超声碎石, 直接数字频率合成器

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

泌尿系统结石是常见病,可引起绞痛,泌尿系统感染及肾功能不全,给病人造成极大的痛苦、随着泌尿外科腔内设备和操作技术的提高,结石的诊断和碎石技术有了长足的发展,主要治疗方法有体外冲击波碎石术(extracorporeal shock wave lithotripsy, ESWL)和体内碎石术(intracorporeal lithotripsy, IL)。体内碎石术包括机械碎石术(mechanical lithotripsy, ML)、液电碎石术(electrohydraulic lithotripsy, EHL)、超声碎石术(ultrasonic lithotripsy, USL)、激光碎石术(laser lithotripsy, LL)和气压弹道碎石术(pneumatic lithotripsy, PL)等。当前结石病患者在临床治疗过程中会出现组织损伤症状,同时能量利用率和碎石打击的准确性等方面仍然有技术改进的空间[1]。本文在早期体内碎石术的基础上,分析钬激光碎石技术,超声碎石技术各自的优缺点,进而将钬激光,超声碎石技术有效结合,互为补充来提高碎石的效率和稳定性。

2. 早期体内碎石术

自1975年分别由Kawi、Classen等[2][3]报道了内镜乳头肌切开术(endoscopic sphincterotomy, EST)以来,在内镜技术和器械附件的研究发展下,应用日益广泛,但对于胆总管内直径 ≥ 1.5 cm的结石,即使内镜乳头肌切开后使用普通取石网篮仍难以取出,若盲目硬取,有造成结石或网篮嵌顿的危险,甚至导致严重的并发症。机械碎石器的问世,解决了胆总管大结石的碎石取出难题,1982年Demling[4]首先报告了内镜下机械碎石术(endoscopic mechanical lithotripsy, EML),开创了机械碎石治疗的先河。机械碎石术操作简便,但并不适用于细胆管内结石,碎石篮相对较大,无法轻松取出高位胆管内部的结石[5],易造成难以控制的出血。

1955年前苏联工程师Yutkin首先发明了液电碎石技术。液电碎石技术是根据高压电产生的高压振荡波原理,将一同轴双极电极置于水中,通电引发双极电极之间高压,两个不同电压的电极之间存在一绝缘层,当两个电极之间的电压差超过绝缘层最大电阻时,电极之间产生火花,形成等离子体(Plasma)[6],破碎结石。液电碎石术适用于胆道结石取石术中结石过大、嵌顿性结石,胆道狭窄或相对狭窄等难取性结石,其产生的冲击波未经聚焦,有灼伤组织的可能,结石每次得到的冲击能量不稳定,应用不当还会损坏内窥镜[7]。

早期体内碎石术提出了普遍适用的基本原理,近20年来,随着泌尿外科腔内设备和操作技术的提高,体内碎石术有了长足发展。

3. 钬激光与超声联合碎石现状

超声碎石术，钬激光碎石术是目前广泛应用于临床的微创体内碎石术，它们有各自的优缺点，医生们开始不再单一地使用超声碎石术或者钬激光碎石术而是交替使用超声碎石机和钬激光碎石机来达到高效碎石清石的目的。

3.1. 超声碎石术

将超声用于碎石的原理是利用以压电效应制成的换能器将电能转换成声波，声波在换能器内产生机械振动，机械能通过超声探针振动碎石，通过空心探针吸附结石细小颗粒，达到碎石清石目的[8]。在处理感染性结石时，其优势更加明显[9]。

经皮肾镜取石术(Percutaneous Nephrolithotomy, PCNL)已成为肾结石尤其是铸型结石的首选方法[10][11]，经皮肾镜超声碎石清石术不但可击碎结石，同时可将结石清除体外，是当今经皮肾镜取石术最为理想的方法，可避免结石对肾盏黏膜的破坏作用。全清除结石，解除梗阻是治疗的关键[12]。临床上多采取“蚕食法”碎石，但对处理铸型大结石时效率不高[13]，采用双导管超声碎石可以提高碎石效率[14]，但是由于吸附结石的内导管腔隙太小，碎石清石率等与单导管超声碎石相近[15]。

3.2. 钬激光碎石术

钬激光碎石机理是其瞬时产生的上千瓦能量可导致光致碎裂作用，且结石表面的水和结石中的水吸收了钬激光的能量后汽化形成小球，汽化小球随后裂解形成的冲击波产生二次压力，使得结石粉碎。医用钬激光器系统主要由钬激光器、激光电源，冷却及密封系统，纤耦合传输系统以及控制与显示系统等五个部分组成。钬激光晶体主要靠 Cr^{3+} 离子吸收闪光灯发出的光，钬激光器采用脉冲氙灯作为泵浦源，聚光腔采用银作为反光材料，需要在银膜上加镀一层介质膜防止银被氧化，该聚光腔采用单椭圆柱型结构。激光谐振腔采用平凹腔，全反镜是曲率半径为 1 m 的曲面镜，输出透镜的透过率为 20%。光纤耦合器传输系统采用低 OH 的石英光纤传输[16]。

钬激光可以粉碎包括坚硬的胱氨酸结石在内的各种成分结石，具有切割，汽化及凝血等功能，可以一并处理阻碍结石排出的远端输尿管狭窄或炎性息肉，且出血较少[17]。钬激光碎石的过程中会发生结石“后退”(retropulsion)现象，造成损伤周围组织，需重新定位光纤端头，延长手术时间等不利影响，尤其是对位于输尿管上段的结石，结石移位是影响碎石成功率有效率的常见原因[18]。

4. 钬激光与超声联合碎石的关键技术

钬激光与超声联合碎石的关键是将钬激光碎石术和超声碎石术的关键技术进行优化达到钬激光碎石和超声碎石良好协同作用的目的。

4.1. 纳秒钬激光输出

纳秒钬激光器的结构如图 1，激光器以 Cr, Tm, Ho:YAG 为激光晶体。在固体激光器中，谐振腔的模式结构发生畸变的主要机理是激光棒的热效应。因为热效应的存在，在增加功率的过程中，热透镜焦距 f 不断缩短，要保持稳定的激光输出，应该选择尽量小的腔长。全反镜用波片进行光学修正，以克服高能量泵浦引起的晶体退偏。采用自动控制的恒温去离子水冷却系统。文献[19]运用具有自主知识产权的中红外电光调 Q 开关技术，大大压缩了输出激光光束的脉宽，可以把输出激光的脉冲宽度压缩到纳秒级，同时能够大大提高输出脉冲的峰值功率。

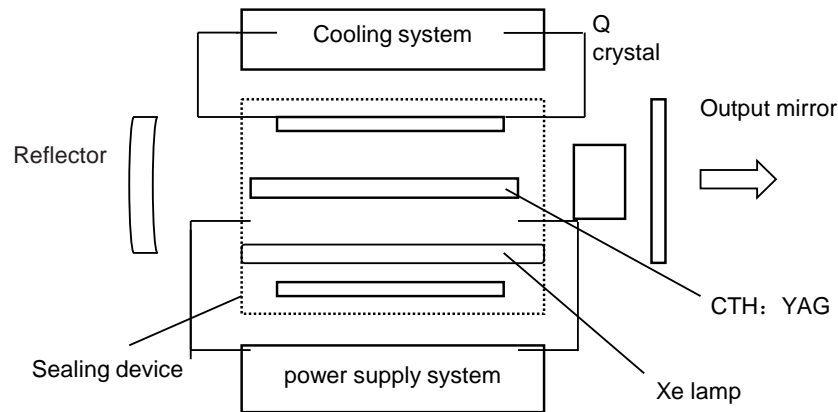


Figure 1. Schematic of nanosecond holmium laser
图 1. 纳秒钬激光器结构示意图

4.2. 频率跟踪技术

超声碎石的一个技术难点是需要使超声换能器始终工作在谐振点附近。由于换能器的谐振点随温度、负载等外界条件不断变化[20],这就需要施加在换能器上的激励信号频率能随着谐振点的改变而迅速调整,即需要应用自动频率跟踪技术。目前大多采用模拟电路实现自动频率跟踪,抗干扰性差,容易出现死锁现象。另外,日本学者 Hiroaki Ikeda 等将锁相环应用在了运行频率 1 MHz 的超声波设备上,达到预期的扫描/跟踪效果[21]。文献[22]提出了一种基于电流搜索与锁相技术复合的频率扫描/跟踪策略,采用基于直接数字频率合成器技术(direct digital frequency synthesis, DDS)的电流搜索法进行粗扫描/跟踪,以大步长快速扫描/跟踪到超声碎石振动系统的谐振频率附近,转为基于锁相技术的精扫描/跟踪,最终实现超声碎石振动系统谐振频率的快速精确扫描/跟踪。其通过单片机变换频率控制字来改变 DDS 芯片的输出频率。输出频率与频率控制字及参考时钟之间有如下关系[23]:

$$f_{\text{out}} = K * \frac{f_c}{2^N} \quad (1)$$

式中: 为 f_c 外部输入参考时钟频率(MHz); f_{out} 为输出信号频率(MHz)。

测试结果表明,运用这种控制方法的超声碎石电源具有频率扫描/跟踪准确,速度快等优点。

4.3. 换能器

使用具有特殊介电特性的超声超材料设计制造夹心式换能器以解决超声碎石系统研发过程中夹心式压电换能器的低电声效率、低寿命问题、在换能器运行过程中中心频率漂移导致的效率下降问题等难点。

4.4. 超声探针

目前超声探针前端为平面管状结构,与结石接触面较大,结石所承受的压强相对较小,且这一结构不易固定结石,结石很容易滑脱移位。在进行超声碎石时,难以通过共振原理击碎坚硬大结石。文献[24]在原平面超声探针前端打磨成 3 个缺口,缺口间形成 3 个很小的钝性弧形凸起的点状结构。缺口与凸起处抛光呈流线型的断面,表面光滑、无毛刺,碎石时探针与结石接触为三点式接触。点触式超声探针吸附清石的内腔大,其清石效率可能会优于内腔较小的双导管超声探针。点触式探针 3 个缺口,在负压吸引清石时,水流从缺口进入,不会象原超声探针那样对粘膜造成吸附损伤。3 个触点为圆滑结构,不会对尿路黏膜造成刺伤。研究表明,点触式探针较平面探针的碎石速度快、效率高、安全性好,可不借助

气压弹道碎石，仍可击碎坚硬的一水草酸钙结石和以草酸钙为主的混合型坚硬结石，有很好的推广应用价值。

4.5. 影响钬激光碎石的相关参数

美国 Texas 大学的 Jansen ED 等[25] [26]研究了没有结石参与的情况下，纯水或 PAA(polyacrylamide)凝胶中激光脉冲宽度和能流密度对气泡形成、气泡尺寸及声压的影响：其他参数相同情况下，脉冲宽度越小对应的最大气泡尺寸越大，声压值越高；能流密度增大，气泡持续时间增长，产生的声压值增大，但是能流密度大到一定程度，其声压反而会随之减小[27]。表 1 列出了一部分研究人员的声压测量结果(数值都是在水中没有结石或固体界面， E_p , τ_p , d_f , H 为相关参数)参与的情况下得到的；归一化声压为按照球形波 $1/r$ 衰减规律修正到距离光纤端头 1 mm 处的声压)，这对于进一步研究钬激光的碎石机制，探讨治疗过程中对周围组织的损伤程度及对光纤的损耗有重要意义。

4.6. 结石成分和 CT 值

文献[31]分析了结石成分、CT 值与超声碎石清石效果的影响。CT 值越低碎石速度越快，相反则慢，但对于少数含有草酸尿酸盐混合结石，由于结石表面结构光滑，即使 CT 值 ≤ 963.42 HU 时，由于超声探针很难固定结石而不易被击碎，碎石速度明显缓慢。

结石成分分析目前仍需在体外进行，依据 CT 值初步判断结石的主要成分尚有局限，但预测 CT 值不但可以大致判断结石成分，还可以对结石治疗方法的选择提供帮助，术前测定 CT 值，大致判断结石成分，超声碎石时，可对碎石时间作初步估算。也可作为预测和评估碎石效率的参考指标之一。

5. 钬激光与超声联合碎石的发展趋势

瑞士产的气压弹道超声碎石机是率先将两种碎石术联合使用的碎石机，相较于单一碎石术的碎石机，气压弹道超声碎石机将气压弹道联合超声碎石清石具有明显优势但是就其本身仍存在很多不足之处。在气压弹道碎石机的基础上，结合钬激光与超声联合碎石的发展趋势，钬激光与超声联合碎石机的发明和应用成为可能。

5.1. 气压弹道超声碎石机

瑞士产第四代 EMS 气压弹道联合超声碎石清石系统将气压弹道碎石和超声波碎石技术相结合，具有碎石清石的功能，可分别使用也可联合使用，负压吸引可同时将小结石颗粒吸出。这项技术比单纯的气

Table 1. The values of sound pressure measured under different parameter settings

表 1. 已报道不同参数设置下测量的声压值

E_p/ml	τ_p/us	$d_f/\mu m$	$H/J/cm^2$	Distance/mm	Sound pressure/bar	Normalized sound pressure/bar
244 [27]	230	600	86	4	180	720
360 [27]	230	200	1146	3	25	75
2000 [28]	300	600	707.7	4	5100	20,400
220 [29]	300	320	311	5	15	45
400 [30]	350	550	168.4	1	20	20
200 [25]	100	400	159.2	1	66	66
480 [26]	180	600	170	3	120	360

压弹道或超声碎石更优越,可显著提高经皮肾镜取石效率、减少手术并发症,提高肾结石的治疗效果[32][33][34]。治疗时间短,患者在治疗后一般两天就可以康复,并且复发概率低。EMS 气压弹道联合超声碎石清石系统应用广泛,适用各个部位,但是气压弹道碎石产生的碎石体积大,不易清理,碎石杆的机械性冲击易使结石反复摩擦集合系统黏膜,造成出血[35],并且难以将高硬度的较大结石彻底粉碎。

临床上通常采用 F22 及 F24 通道,配合 EMS 第四代气压弹道联合超声碎石系统,该系统采用负压吸引碎石。当灌注流量相对固定时,术中肾盂内压主要受通道鞘流出道截面积及吸引流量的影响。负压过小则吸引清石效率低,易导致碎石粒堆积在碎石杆腔内,容易导致肾盂内高压,而负压过大则会导致空气自皮肾鞘进入视野,积水肾腔塌陷,黏膜血管损伤,均会影响视野,在使用 EMS 碎石清石系统时往往容易为了保持清晰的视野而降低负压吸引流量[36],小的通道术中术后出血量较传统的标准通道(F26~F30)要少[37],但是由于相对过小的通道不能及时排出灌注液,从而不知不觉导致肾盂内高压,肾盂压力超过 40 cm H₂O 有可能导致持续的肾盂静脉及淋巴管反流,当存在感染时,甚至 20~24 cm H₂O 的压力便可造成反流[38]。同时由于气压弹道联合超声碎石清石系统的结构特殊复杂,应采用间断输出方式防止碎石探针过热,针管易堵塞,换能器发热[39]。

5.2. 钬激光超声联合碎石机

钬激光碎石采用纳秒钬激光碎石技术,拥有更高的峰值功率和更短的作用时间(峰值功率提高了 3000 倍,最窄脉冲宽度减小到原来的 1/3000),具有极强的光动力,瞬间能量越大,被粉碎的颗粒越小,被粉碎后的结石相对处于静止状态,减小了渗水的可能性,而且钬激光的辐射可以有效地抵抗细菌防止感染,有利于角鹿状结石的治疗[40],由于传输光纤的柔韧性,可以配合较为柔软的内窥镜(如输尿管软镜)使用,能够到达结构复杂的部位。对于硬度高、比较大的结石先用纳秒钬激光多处打孔碎石,再通过超声将结石粉碎并吸出;对于硬度小的结石可以直接使用超声将结石粉碎并吸出,大大提高治疗效率,加快手术进程,同时减少超声碎石探针的损耗。钬激光联合超声碎石取石治疗高效安全,值得临床推广应用,但是国内外尚无关于钬激光超声联合碎石机临床应用的文献报告。

6. 结论

钬激光与超声联合碎石是最为具有实用性,高效性的碎石技术,正受到越来越多研究者的关注。目前,钬激光与超声联合碎石机的研究还未进入临床阶段,采用的控制系统多为触摸屏实现人机交互。通过触摸屏控制碎石机的工作,包括启动、运行,碎石方式选择等,将钬激光碎石和超声碎石有效地联合起来,提高碎石效率,改善治疗效果。要使钬激光超声联合碎石机真正达到实用化的程度,需要在操作的安全性,信号处理的实时性及系统的稳定性上不断改进。

致 谢

感谢圣彼得堡国立信息技术机械与光学大学苏州国科医疗科技发展有限公司,北京国科华仪科技有限公司,中国科学院苏州生物医学工程技术研究所技术研发支持,长春理工大学得以推进项目顺利完善。

基金项目

国家国际科技合作专项(L2015RR0054)。

参考文献 (References)

- [1] 金雯, 赵李俊. 体外冲击波碎石机[J]. 现代医学仪器与应用, 2003(3): 26-27.
- [2] Kawai, K. (1973) Endoscopic Treatment of Polypectomy and Peppilotomy Hawaii Regional Meeting of the 38th An-

- nual Conuention of the American College of Castroenterology. *Honolulu*, 31.
- [3] Classen M. and Demling, L. (1974) Endosuoipische Sphincterotomie der Papilla Vateri und Steinextraktion aus dem Ductus Choledochus. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, **99**, 496-497. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1107790>
- [4] Demling, L., Seuberth, K. and Riemann, J.F. (1982) New Methods and New Instruments. *Endoscopy*, **14**, 100-101.
- [5] 万欣. 基于肝内胆管结石的外科治疗综述[J]. 中国继续医学教育, 2015, 7(8): 19-20.
- [6] 孙西钊, 贺雷. 接触式碎石器[J]. 现代实用医学杂志, 2007, 19(4): 255-258.
- [7] 黄永斌, 刘兆飞, 黄金辉, 等. 点触式超声探针的研制与实验研究并临床应用初探[J]. 中国内镜杂志, 2015, 21(4): 337-340.
- [8] Teodorovich, O.V., Zabrodina, N.B., Dzhaber, D., *et al.* (2002) Results of Transcutaneous Nephrolithotripsy Using the Combined Lithotripter "2 in 1" "Swiss Lit hoclast Master". *Urologii*, **5**, 44-49.
- [9] Soucy, F., Ko, R., Duvdevani, M., *et al.* (2009) Percutaneous Nephrolithotomy for Staghorn Calculi: A Single Center's Experience over 15 Years. *Journal of Endourology*, **23**, 1669-1673. <https://doi.org/10.1089/end.2009.1534>
- [10] 徐宏伟, 金承俊, 阎俊, 等. 经皮肾镜取石术的研究现状及并发症防治策略[J]. 临床泌尿外科杂志, 2014, 29(2): 174-177.
- [11] Desai, M., Jain, P., Ganpule, A., *et al.* (2009) Developments in Technique and Technology: The Effect on the Results of Percutaneous Nephrolithotomy for Staghorn Calculi. *BJU International*, **104**, 542-548. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2009.08472.x>
- [12] 李应忠, 王健, 业磊, 等. 经输尿管镜钬激光碎石与气压弹道碎石治疗输尿管结石疗效比较[J]. 中国内镜杂志, 2013, 19(7): 779-781.
- [13] 李杨, 曾峰, 杨中青, 等. B超引导下经皮肾镜双导管碎石术与气压弹道联合超声碎石术治疗鹿角形肾结石的疗效比较[J]. 中南大学学报(医学版), 2013, 38(8): 853-856.
- [14] Krambeck, A.E., Miller, N.L., Humphreys, M.R., *et al.* (2011) Randomized Controlled, Multicentre Clinical Trial Comparing a Dual-Probe Ultrasonic Lithotrite with a Single-Probe Lithotrite for Percutaneous Nephrolithotomy. *BJU International*, **107**, 824-828. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2010.09567.x>
- [15] 谢靖, 李正佳, 王勇, 崔鸿忠. 用于尿道碎石术的医用钬激光器设计[J]. 激光杂志, 2004, 25(6): 9-10.
- [16] 赵永斌, 张利朝, 邓志雄, 等. 腔内钬激光治疗输尿管结石并发息肉 115 例分析[J]. 临床泌尿外科杂志, 2010, 25(1): 14-15.
- [17] Argyropoulos, A.N. and Tolley, D.A. (2010) SWL Is More Cost-Effective than Uteroscopy and Holmium: YAG Laser Lithotripsy for Ureteric Stones: A Comparative Analysis for a Tertiary Referral Centre. *Journal of Clinical Urology*, **3**, 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.bjmsu.2010.01.002>
- [18] 陈瑞涛, 顾华东, 郑陈琪. 钬激光超声综合碎石治疗仪的研制[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(10): 18-19.
- [19] 陈志华, 赵淳生. 一种简单实用的超声电机频率跟踪控制技术[J]. 压电与声光, 2003, 25(2): 149-151.
- [20] Tauu, S., Hiroaki, I. and Hirofumi, Y. (1999) Megasonic Transducer Drive Utilizing MOSFET DC-to-RF Inverter with Output Power of 600 W at 1 MHz. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **46**, 1159-1173. <https://doi.org/10.1109/41.808006>
- [21] 张生芳, 邢志超, 马付建, 等. 基于电流搜索与锁相技术的超声碎石电源频率扫描跟踪[J]. 大连交通大学学报, 2016, 3(1): 101-104.
- [22] 马村建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013: 82-84.
- [23] 黄永斌, 王军起, 黄晓明, 等. 点触式探针和平面探针超声碎石清石效果比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(6): 897-900.
- [24] Jansen, E.D., Asshauer, T., Frenz, M., *et al.* (1996) Effect of Pulse Duration on Bubble Formation and Laser-Induced Pressure Waves during Holmium Laser Ablation. *Lasers in Surgery and Medicine*, **18**, 278-293.
- [25] Asshauer, T., Delacretaz, G., Jansen, E.D., *et al.* (1997) Pulsed Holmium Laser Ablation of Tissue Phantoms Correlation between Bubble Formation and Acoustic Transients. *Applied Physics B*, **65**, 647-657. <https://doi.org/10.1007/s003400050327>
- [26] Asshauer, T., Rink, K. and Delacretaz, G. (1994) Acoustic Transient Generation by Holmium-Laser-Induced Cavitation Bubbles. *Journal of Applied Physics*, **76**, 5007-5013.
- [27] Sperrin, M. and Rogers, K. (1999) Determination of the Shock Wave Intensity from a Laser Lithotripter Using a Bi-Laminar Hydrophone. *IEE Colloquium on Innovative Pressure, Force and Flow Measurements*, London, 26-26 October 1999, 3/1-3/5.

- [28] Schafer, S.A., Durville, F.M., Jassemnejad, B., *et al.* (1994) Mechanisms of Biliary Stone Fragmentation Using the Ho: YAG Laser. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **41**, 276-283. <https://doi.org/10.1109/10.284946>
- [29] Chan, K.F., Vassar, G.J., Pfefer, T.J., *et al.* (1999) Holmium: YAG Laser Lithotripsy: A Dominant Photothermal Ablative Mechanism with Chemical Decomposition of Urinary Calculi. *Lasers in Surgery and Medicine*, **25**, 22-37. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9101\(1999\)25:1<22::AID-LSM4>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9101(1999)25:1<22::AID-LSM4>3.0.CO;2-6)
- [30] 黄永斌, 刘兆飞, 黄金辉, 等. 结石成分和 CT 值对超声碎石的效率影响分析[J]. 中国内镜杂志, 2015, 21(1): 87-89.
- [31] Olbert, P., Weber, J., Hegele, A., *et al.* (2003) Combining Lithoclast and Ultrasound Power in One Device for Percutaneous Nephrolithotomy: *In Vitro* Results of a Novel and Highly Effective Technology. *Urology*, **61**, 55-59. [https://doi.org/10.1016/S0090-4295\(02\)02256-2](https://doi.org/10.1016/S0090-4295(02)02256-2)
- [32] Auge, B.K., Lallas, C.D., Pietrow, P.K., *et al.* (2002) *In Vitro* Comparison of Standard Ultrasound and Pneumatic Lithotrities with a New Combination Intracorporeal Lithotripsy Device. *Urology*, **60**, 28-32. [https://doi.org/10.1016/S0090-4295\(02\)01624-2](https://doi.org/10.1016/S0090-4295(02)01624-2)
- [33] Pietrow, P.K., Auge, B.K., Zhong, P., *et al.* (2003) Clinical Efficacy of a Combination Pneumatic and Ultrasonic Lithotrite. *The Journal of Urology*, **169**, 1247-1249. <https://doi.org/10.1097/01.ju.0000049643.18775.65>
- [34] Prabakaran, S., Teichman, J.M., Spore, S.S., *et al.* (1999) Proteus Mirabilis Viability after Lithotripsy of Struvite Calculi. *The Journal of Urology*, **162**, 1666-1669. [https://doi.org/10.1016/S0022-5347\(05\)68192-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5347(05)68192-X)
- [35] 曾鹏, 蒋重和, 莫鉴锋, 等. 新型标准肾镜联合第四代碎石清石系统经皮肾镜取石术中肾盂内压变化[J]. 现代泌尿外科杂志, 2016, 21(10): 768-771.
- [36] Kukreja, R., Desai, M., Patel, S., *et al.* (2004) Factors Affecting Blood Loss during Percutaneous Nephrolithotomy: Prospective Study. *Journal of Endourology*, **18**, 715-722. <https://doi.org/10.1089/end.2004.18.715>
- [37] Troxel, S.A. and Low, R.K. (2002) Renal Intrapelvic Pressure during Percutaneous Nephrolithotomy and Its Correlation with the Development of Postoperative Fever. *The Journal of Urology*, **168**, 1348-1351.
- [38] 郭振宇, 曹扬, 邹庆辉, 姜晓泽. 超声气压弹道碎石机(四代)常见故障的维修[J]. 中国医学工程, 2017, 25(1): 45-47.
- [39] Cuellar, D.C. and Averch, T.D. (2004) Holmium Laser Percutaneous Nephrolithotomy Using a Unique Suction Device. *Journal of Endourology*, **18**, 780-782. <https://doi.org/10.1089/end.2004.18.780>
- [40] 顾正勤, 齐隽, 孙颖浩, 等. 经皮肾镜钬激光联合超声碎石取石治疗复杂性肾结石[J]. 中国激光医学杂志, 2009, 18(2): 101-104.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: iae@hanspub.org