

文章编号:1000-582X(2007)08-0128-06

ESWL 中的空化效应

陈景秋, 邓 艇, 田祖安

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030)

摘要:基础理论分析、数值模拟、体外实验及临床实践均说明体外冲击波粉碎结石技术(ESWL)中的空化现象既是碎石的主导机制之一,也是人体组织损伤的主要因素之一。对 ESWL 中的空化效应迄今为止的研究作了综述,为进一步研究 ESWL 奠定基础。ESWL 中空化效应的研究还面临着很多的困难和挑战,需要理论研究的深入,数值方法的创新以及实验技术的不断改进,还必须进行大量严格的临床实验。与理论分析和实验技术条件相比,数值模拟是研究 ESWL 中空化现象的一种经济而安全的方法。

关键词:ESWL;空化效应;数值模拟

中图分类号:TB126

文献标志码:A

ESWL(Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy)是冲击波在医疗领域的一项成功应用,因其使用便捷,粉碎结石效率高,无侵入等特性,至今已成为肾结石患者的首选治疗方法。但是这种技术也有若干有待完善之处,例如:对于大结石 ESWL 的治疗效率较低;衡量碎石器冲击波以及碎石效率的标准还在不断地完善之中;国内外大量的临床事实充分说明 ESWL 并非无创伤,对人体组织有着短期或者长期的负作用,甚至会造成功能的不可逆性丧失等等^[1-2]。

1 ESWL 的机理

1.1 ESWL

目前临床使用的主流 ESWL 机型大致可分为^[1]: 1)液电反射式(Electro-hydraulic); 2)声学透镜聚焦式(Acoustic lens focusing); 3)压电陶瓷式(Piezoelectric),其他尚有机电式(Electro-mechanical)、微爆炸式等。就其基本力学原理而言,它们都利用了水下冲击波聚焦及其诱发的空化的破坏作用。

液电式 ESWL 出现最早,目前也最普及。它的基本原理是:

水下由旋转椭圆面的一个几何焦点 F_1 处发出球面冲击波,经过旋转椭圆面反射体一个对称片段的

反射,其反射波的收敛部分在另一焦点 F_2 附近聚焦,形成高压区而粉碎结石,如图 1 所示^[3]。

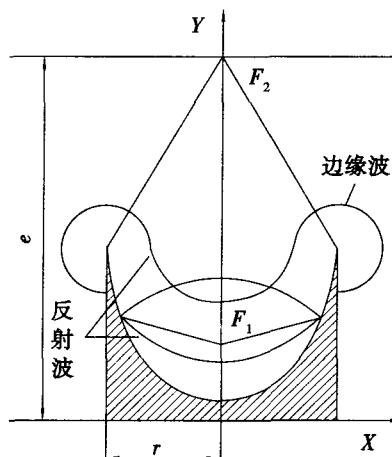


图 1 冲击波聚焦实验示意图

数值模拟说明^[3],液电式 ESWL 中的冲击波经反射后出现的负压力随着聚焦而加强,可高达 $-4 \sim -10$ MPa。流体中的负压力即拉力,较大的负压在水中将导致空化。水中冲击波反射聚焦时出现空化是不可避免的,因为作为数值模拟出发点的理论模型并不包含任何微气泡结构或杂质微粒,说明即使“纯水”中冲击波聚焦过程中也会引发空化。空化理论也指出:

收稿日期:2007-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10472136);重庆市自然科学基金资助项目(02058)

作者简介:陈景秋(1944-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事力学研究,(Tel)023-65105826;

(E-mail)jqchen@cqu.edu.cn。

由于空化核存在的影响因素很多,即使很纯净的液体,在压力变化的同时一样会发生空化现象,二者是一致的^[4]。另外,空化形成的气泡在液体与组织界面处溃灭时将产生射流,其速度最大值可达到 120 m/s,腐蚀力很大。

1.2 ESWL 的碎石机理

ESWL 通过一系列作用在结石上的力使其破裂粉碎,其过程比较复杂。至今 ESWL 的碎石机制逐渐被人们所认识,但仍然存在某些争论。其中应力直接破坏机制已经比较清楚,空化破坏机制正是当前 ESWL 研究的一个热点^[5]。

1.2.1 拉应力和剪应力

拉应力和剪应力会造成结石的脆性破裂^[6]。拉应力是由于冲击波的压力部分被结石与液体界面反射后反相形成拉力波所产生。这个反射波与入射波尾部的负波(拉力波)叠加产生一个最大拉应力,正是这种拉应力碎裂了结石,如图 2。这就是著名的 Hopkinson 效应。

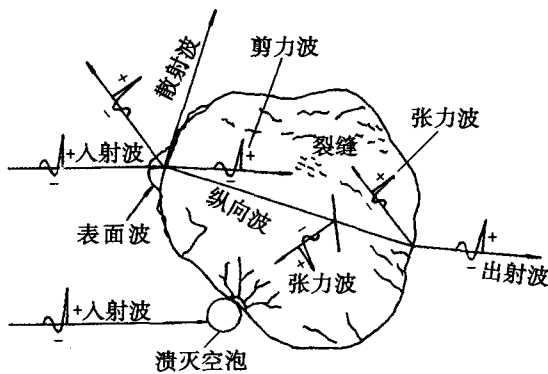


图 2 应力及空化效应

图 3 中圆柱形人工结石的轴向尺寸和端面直径均为 10 mm,几何中心与压电式 ESWL 球心重合,轴线与压电式 ESWL 球面对称轴重合。其左端面可见密布的空蚀斑;冲击波及紧随其后的拉力波多次反复交替作用于圆柱形人工结石,结石发生脆性断裂。若结石远端端面垂直于轴向的平面,在结石远端面内侧邻近分布的拉应力常导致结石沿平行于结石端面的平面断裂。其他形状的结石可能形成不同冲击波的汇聚效应。一般情况下,如果在治疗过程中结石未发生旋转,结石内最早的主要裂纹将出现在与冲击波传播方向垂直的某个平面上。

1.2.2 准静态挤压作用

Eisenmenger^[7]提出了所谓的挤压(squeezing)破坏机制,他指的是与准静态周期性压缩有关的现象。假设结石直径小于声学焦区的宽度,在结石周围存在

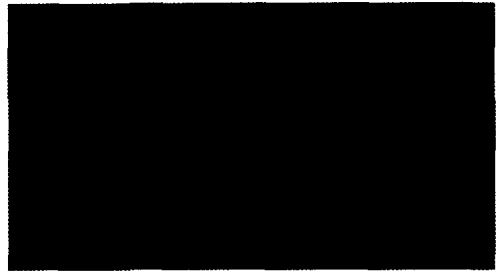


图 3 圆柱形人工结石的 ESWL 实验样本

压力,由于声波在水中(或软组织中)的速度和在结石中不同,在结石周围及其内部有压力存在。压力波的正压部分通过对结石的准静态挤压作用(如图 4),导致了平行或者垂直于波传播方向的初始分裂面的二次粉碎。

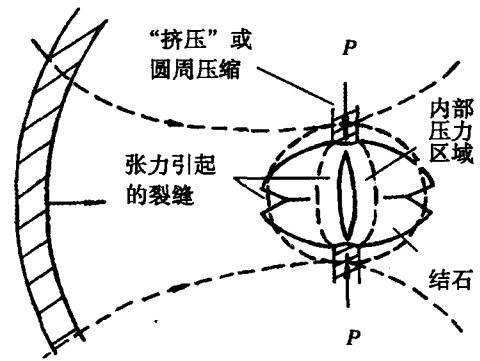


图 4 准静态挤压作用

1.2.3 动力学疲劳

动力学疲劳^[8]指的是有缺陷的脆性材料(如结石)中的微小裂纹随着拉力和压力的交替作用而发展。这种作用力可能来自直接入射的冲击波,或是结石表面充满液体的微小裂纹中,这些裂纹在上述应力的反复作用下逐渐彼此连接,以致产生宏观裂纹而破裂。此理论建立了结石的物理特性(断裂韧度、声速、密度和空隙度)与冲击波参数(峰值压力、脉冲宽度、脉冲轮廓和粉碎所需冲击波数目)的联系。

1.2.4 空化效应

除了对结石直接的应变作用之外,会聚冲击波在结石的周围水中产生空化效应。空化效应同样存在于结石微裂缝的水中,会劈开结石中不同物质的交界面。在实验室条件下观察到人造结石的前部和背部都会出现空化效应。空化效应可使不易被拉应力和剪应力破坏的物质(如胱氨酸、胆固醇)发生碎裂。通过使用高粘性介质来抑制空化效应或者超高压将明显降低冲击波的碎石率。这也表明了空化效应在结石瓦解过程中的显著作用。最近研究表明,在初始碎石冲击波引起的空泡溃灭时产生的二次冲击波明显提高了结石粉碎效率。空化效应似乎还是冲击波导致的组织损伤、脉

管损伤或者自由基释放的最重要因素。

入射波和反射波引起的断裂、动力学疲劳和挤压统称为冲击波的直接破坏机制,这3种机制都可以归结为冲击波的直接作用。而空化效应既是碎石的主导机制之一,也是人体组织损伤的主要因素之一。因此,所有的这些理论都不能单独解释冲击波引起结石粉碎的整个现象,但是它们各自在这个复杂过程中都扮演了非常重要的角色。

2 ESWL 中空化的因素

ESWL 中空化现象的因素主要有脉冲重复频率(PRF)、初始空泡数密度以及冲击波强度以及液体介质粘性等。

2.1 脉冲重复频率的影响

临床经验表明:0.5 Hz 的脉冲频率不仅使得结石粉碎效率更高,而且也降低了组织的损伤。然而为了减小治疗时间,临床使用最多的脉冲重复频率通常是 1 Hz,甚至采用 2 Hz。

脉冲重复频率是通过改变空泡的平衡半径来影响治疗效果。Tanguay^[1]采用 Church 压力波形对单个空泡进行数值计算,得到空泡半径随脉冲重复频率的变化曲线,表明空泡尺寸在足够数量的脉冲之后会达到一个动态平衡,即空泡平衡半径。脉冲重复频率越高,空泡平衡半径就越大,在空泡数目密度一定的情况下释放出越多的能量。

Delius 和 W. Mueller 等^[9]在动物体试验中发现增大脉冲重复频率会使组织损伤更严重;Cwik 等^[10]用纹影法发现空化现象在不同的脉冲重复频率下有定性的差别:频率低于 0.05 Hz 时,第二次冲击波不会影响到第一次冲击波引起的空泡溃灭,而且在频率较高时声致发光没有低频时明显。

2.2 空泡数目密度的影响

Tanguay^[1]通过改变空泡数目密度和平衡半径,对焦点处的空泡场进行了数值计算,结果与实验相吻合,表明空泡云的持续时间是空泡平衡半径和空泡数目密度的函数。对于空泡数目密度大的情形,空泡云溃灭过程将释放出大量能量,部分以球形膨胀压力波释放,而在溃灭不均匀时则以微射流形式释放,这将导致固体表面出现蚀损斑。但同时空泡场的存在也阻碍了冲击波的传播和聚焦,将使焦点处的压力降低。

2.3 冲击波强度的影响

Tanguay^[1]采用数值模拟方法,得到 Caltech-EHL 碎石器在不同的冲击波强度下焦点附近的最大压力值。结果表明冲击波强度增加,空泡云溃灭释放的能量也随之增加。但是冲击波能量的增加同样提高了云

中空泡的最大尺寸和持续时间,而且附加质量的转移,需要适当地降低脉冲重复频率以保证焦区中空化核尺寸不至于增加,但这样治疗时间就会延长;而对于给定条件的空泡场,难以确定空化核尺寸和空泡数目密度之间的明显趋势变化,结石的粉碎率不会随着碎石器强度的增加而提高。因此,并不是碎石器功率越大碎石效果越好,而必须在脉冲强度和对应的重复频率的范围内,选择一个适当的结合点,在保持最佳结石粉碎率的同时使得组织破坏最小。

2.4 液体介质粘性的影响

黄继汤^[11]利用高速摄影技术在不同的粘性液体中对电火花放电造成的空泡膨胀及压缩过程的观测表明:受液体粘性影响,空泡膨胀及压缩过程明显变缓,空泡的生命周期随着粘滞系数 μ 值的增加而增加;Bailey 等^[12]的研究发现,与放在水中的结石相比,置于丙三醇中的结石粉碎率并不会随 PRF 的改变而得到加强;Songlin 和 Franklin 等^[13]在研究应力波传播情况和空化现象时发现,当置于水中的结石被破坏成很小的颗粒时,置于调味油中的结石尺寸还相当大。当轰击人造结石的冲击波次数从 25 次增加到 500 次时,两种液体中的结石粉碎率分别从 3% 增大到 66%, 2% 增大到 11%。他们在对人体肾结石的试验中也得到了类似的结果。表明液体的粘性大大抑制了其中的空化现象。

2.5 其它影响

Cleveland 等^[14]的试验结果指出,如果贴着结石放置一层聚酯薄膜,空化现象会明显减小。临床治疗中常常采用耦合剂以利于冲击波的传播,不同的耦合剂对空化效应也有显著的影响,致使碎石效率不尽相同^[15]。

3 空化效应的研究

3.1 空化理论的发展

Rayleigh^[16]最早对空化现象进行理论研究,建立了不可压缩流体中理想球形气泡的运动方程。之后 Plesset^[17]、Cole^[18]、Noltingk 和 Neppiras^[19]以及 Gilmore^[20]等考虑了空泡含气量、表面张力、粘性以及可压缩性因素对空泡运动的影响后,对 Rayleigh 方程进行了修正,得到了考虑不同因素的气泡运动方程。

对空泡溃灭的理论分析目前均以球形溃灭的假设为基础。对于偏离球形不大的空泡,Plesset^[21]、Benjamin 和 Ellis^[22]、Shima^[23]、Mitchell 和 Hammit^[24]、Hsieh^[25]、Bevir 和 Fielding^[26]等建立非球形空泡运动的运动方程并进行了分析。然而,对于偏离球形很大的空泡运动,目前理论上仍然没有很好的解决。

3.2 数值计算

对于空泡溃灭中射流现象的产生,目前还没有解析结果,主要依靠数值计算来进行。Plesset 和 Chapman^[18]第一次利用有限差分法进行了空泡溃灭的流场计算,得到了射流现象;Mitchell 和 Hammitt^[24]利用修正的 MAC 方法来模拟空泡溃灭的流场;Gibson 和 Blake^[27]、Blake 和 Gibson^[28]利用变分法将问题转化为近似的积分方程,研究气泡在固壁面及自由面附近的溃灭情形。

在格林定理的基础上利用直接边界元法研究空泡溃灭的方法越来越普遍:Guerra、Lucca 和 Prosperetti^[29]、Cerone 和 Blake^[30]、Blake、Taib 和 Doherty^[31-32]针对轴对称问题进行了数值模拟;Chahine 和 Perdue^[33]对三维气泡的情形进行模拟,数值解与实验现象相当吻合。

然而,边界元法只能计算到泡的上表面与下表面发生抨击的时刻,对空泡的抨击后期没法计算。Lundergren 和 Mansour^[34]将空泡溃灭分成两阶段来考虑,空泡由开始的状态到泡的上下表面碰到一起为第一阶段,利用一般的边界元方法进行处理;接下来的阶段为第二阶段,引进了一条涡线,这样即使空泡溃灭的计算得以延续,又模拟了空泡溃灭的后期产生了涡量的现象。Best^[35]采取类似的方法来模拟空泡溃灭后期的运动,数值计算出空泡的反弹现象。特别值得一提的是 Zhang, Duncan 和 Chanine^[36-37]利用了修正的普通边界元方法及高阶边界元方法计算了空泡溃灭的整个过程,计算的结果与实验现象非常吻合。

3.3 实验研究

空化过程中的空化初生、高速射流及空化噪音、声致发光等现象是实验研究空化效应的主要着手点。

3.3.1 空化初生

当流速不变而压强降低(或压强不变流速增加)时,流场极小区域内偶然初次出现微小空穴的临界状态称为空化初生。判断空化初生的方法主要有以下几种:1)目测法;2)噪声法;3)光学法;4) γ 射线法;5)全息摄影法;6)纹影法。目前,国内外应用的主要还是目测法和噪声法^[38]。

3.3.2 射流与空化噪音

人们从 20 世纪 60 年代末期开始利用电解泡、火花泡来做空泡溃灭的实验,但是自从利用激光产生空泡后,空泡溃灭的试验才得以大大的发展。Gibson^[39]、Kling 和 Hammitt^[40]、Mitchell 和 Hammitt^[24]利用激光泡作过许多空泡溃灭的试验,得到了空泡溃灭产生射流的速度,结果与数值解相吻合。Lauterborn^[41]利用高速照相机拍下空泡溃灭的一系列瞬态

的空泡形状,求出射流的速度约为 120 m/s,与 Kling 和 Hammitt 利用火花泡试验得到的结果一致;与 Plesset 和 Chapman 利用数值求解得出的结果 130 m/s 也相当接近。Vogel 和 Lauterborn^[42-43]综合利用 PIV 技术及高速照相技术,清楚地显示了空泡溃灭的整个细节过程,得到的空泡运动规律与 Kucera 和 Blake^[44]的数值结果相一致。

ESWL 中对空化噪音的理论研究(Church)和实验研究(Coleman et al;Zhong et al;Bailey et al)表明:在自由场和约束介质场中,空泡快速振动产生的声学发射(Acoustic Emission;AE)现象具有特有的双迸发结构。于是,空泡的溃灭时间就定义为第一个和第二个 AE 迸发峰值之间的延迟时间^[45],便于计算。

3.3.3 声致发光

空泡溃灭时将导致超强压缩和超高温,并产生声致发光现象,通过光谱可以测量空泡溃灭时的压力和温度。1990 年, D. F. Gaitan 和 L. A. Crum 等^[46]首次实现和研究了单泡声致发光,发现单泡声致发光的发射光谱是一个连续谱,而多泡声致发光有一个 OH 谱线,显示它们可能有本质的不同;近年来的又一实验进展是 J. B. Young^[47]及其合作者对弱的单泡声致发光的观测,发现极弱的单泡声致发光的光谱也包含 OH 线谱,和多泡声致发光一样。

2002 年 Science 杂志发表了橡树岭国家实验室 Taleyarkhan 等^[48]在微小气泡反应中探测到中子的实验。实验实际上是多泡声致发光而不是单泡声致发光,说明多泡发光和单泡发光可能在本质上是一致的。

ESWL 中很多重要参数——压力、空泡数目密度、空泡最大半径、空泡的坍塌时间等等,都可以通过上述实验方法得到,其中压力可采用压电式和 PVDF 膜水听器进行测量,目前常用光纤光学探针水听器进行^[45]。

4 结束语

ESWL 中空化效应的研究还面临着很多的困难和挑战,需要理论研究的深入,数值方法的创新以及实验技术的不断改进,而且基于对患者健康安全负责的态度,还必须进行大量严格的临床实验。与理论分析和实验技术条件相比,数值模拟是研究 ESWL 中空化现象的一种经济而安全的方法。

参考文献:

- [1] MICHEL T. Computation of bubbly cavitating flow in shock wave lithotripsy[D]. California: California Institute of Technology, 2004.

- [2] ANDREAS S, GERASIMOS A, JEAN DE LA ROSETTE. Extracorporeal shock wave lithotripsy 25 year later: complications and their prevention [J]. *European Urology*, 2006, 1207:1-10.
- [3] 陈景秋. 冲击波聚焦粉碎人体结石过程中的空化现象的数值模拟[J]. *中国生物医学工程学报*, 2001, 20(1): 53-55.
- [4] JENS J, RASSWEILER GEERT G, TAILLY CHRISTIAN C. Progress in lithotripter technology[J]. *EAU Update Series*, 2005(3):17-36.
- [5] CHRISTOPHER E BRENNEN. Cavitation and bubble dynamics[M]. [S. l.]: Oxford University Press, 1995.
- [6] CHAUSSY C, BRENDDEL W, SCHMIEDT E. Extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves[J]. *Lancet*, 1980, 2:1265.
- [7] WOLFGANG E. The mechanisms of stone fragmentation in ESWL [J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2001, 27(5): 683-693.
- [8] LOKHANDWALL M, STURTEVANT B. Fracture mechanics model of stone comminution in ESWL and implications for tissue damage [J]. *Phys Med Biol*, 2000, 45: 1923-1940.
- [9] WILLIAMS A R, DELIUS M, DOUGLAS L, et al. Investigation of cavitation in flowing media by lithotripter shock waves both in vitro and in vivo[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 1989, 15(1): 51-60.
- [10] ANDRZEJ C, TANJA R. An experimental study of cavitation effects due to shock waves [R]. [S. l.]: Ultrasonics Symposium, 1993.
- [11] 黄继汤. 液体粘性对空泡生存过程的影响[J]. *北京建筑工程学院学报*, 1994, 10(2): 124-131.
- [12] MICHAEL R BAILEY, LAWRENCE A C. Cavitation in shock wave lithotripsy [R]. Osaka: Fifth International Symposium on Cavitation, 2003.
- [13] ZHU S L, FRANKIN H, COCKS. The role of stress waves and cavitation in stone comminution in shock wave lithotripsy[J]. *Ultrasound in Med & Biol*, 2002, 28(5): 661-671.
- [14] MICHAEL R B, ROBIN O C. Cavitation in shock wave lithotripsy [R]. Osaka: Fifth International Symposium on Cavitation, 2003.
- [15] 韩见知, 吴开俊. 体外冲击波碎石技术[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004.
- [16] RAYLEIGH J W. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. *Philos Mag*, 1917, 34: 94-98.
- [17] PLESSET M S, CHAPMAN R B. Collapse of a initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary [J]. *J Fluid Mech*, 1917, 47: 283-290.
- [18] COLE R H. Underwater explosions [M]. Princeton: Princeton U P, 1948.
- [19] NOLTINGK B E, NEPPIRAS E A. Cavitation produced by ultrasonics [J]. *Proc Phys Soc*, 1950, 63B: 674-685.
- [20] GILMORE F R. The growth and collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid [R]. California: Hydro Lab Calif Inst Tech Report, 1952: 26-40.
- [21] PLESSET M S, ZWICK S A. Bubble dynamics and cavitation [J]. *Ann Rev Fluid Mech*, 1977, 9: 145-185.
- [22] BENJAMIN T B, ELIIS A T. The collapse of cavitation bubble and the pressures thereby produced against solid boundaries [J]. *Phil Trans*, 1966, A 260: 221-240.
- [23] SHIMA A. The behaviour of a spherical bubble in the vicinity of a solid wall [J]. *J Basic Eng*, 1968, 90: 75-89.
- [24] MITCHELL T M, HAMMITT F G. Asymmetric cavitation bubble collapse [J]. *J Fluids Engng Trans ASME*, 1973, 195: 29-37.
- [25] HSIEH D Y. Variational method and dynamics of nonspherical bubbles and liquid drops [C] // *Finit-Amplitude Wave Effects in Fluids*. Copenhagen: [s. n.], 1974.
- [26] BEVIR M K, FIELDING P J. Numerical solution of incompressible bubble collapse with jetting in moving boundary problems in heat flow and diffusion [M]. [S. l.]: Clarendon Press, 1974.
- [27] GIBSON D C, BLAKE J R. Growth and collapse of cavitation bubble near flexible boundaries [C] // *Proc 7th Austral Hydraulics and Fluid Mech Conf Brisbane*. Australia: Institution of Engineers Syder, 1980: 283-286.
- [28] BLAKE J R, GIBSON D C. Growth and collapse of a cavity near free surface [J]. *J Fluid Mech*, 1981, 111: 123-140.
- [29] GUERRI L, LUCCA G, PROSPERETTI A. A numerical method for the dynamics of non-spherical cavitation bubbles [C] // *Proc 2nd Intl Colloq on Drops and Bubbles*. California: [s. n.], 1981: 175-181.
- [30] GERONE P, BLAKE J R. A note on the instantaneous streamlines, pathlines and pressure contours for a cavitation bubble near a rigid boundary [J]. *J Austral Math Soc*, 1987, B26: 31-44.
- [31] BLAKE J R, TAIB B B, DOHERTY G. Transient cavities near boundaries, part 1 rigid boundary [J]. *J Fluid Mech*, 1986, 170: 474-497.
- [32] BLAKE J R, TAIB B B, DOHERTY G. Transient cavities near boundaries, Part 2 free surface [J]. *J Fluid Mech*, 1987, 181: 197-212.
- [33] CHANINE G L, FERDUE T O. Simulation of the three-dimension behaviour of an unsteady large bubbled near a structure [C] // *In Drops and Bubbles, Third Intl Colloq Monterey*. [S. l.]: American Institute of Physics, 1988: 188-199.

- [34] LUNDGRER T S, MANSOUR N N. Vortex ring bubbles[J]. J Fluid Mech, 1991, 224: 177-190.
- [35] BEST J. The formation of toroidal bubbles upon the collapse of transient cavities [J]. J Fluid Mech, 1993, 251: 79-107.
- [36] ZHANG, DUNCAN H. On the nonspherical collapse and rebound of a cavitation bubble[J]. J Fluid Mech, 1991, 224: 33-37.
- [37] ZHANG, DUNCAN H, CHANINE L. The final stage of the collapse a cavitation bubble near a rigid wall [J]. J Fluid Mech, 1993, 257: 147-181.
- [38] 杨庆, 张建民, 戴光清, 等. 空化形成机理和比尺效应[J]. 水利发电, 2004, 30(4): 55-59.
- [39] GIBSON D C. Cavitation adjacent to plane boundary [C] // Proc 3rd Conf Hydraul Fluid Mech. Sydney: Austr Inst Engrs, 1968: 210-214.
- [40] KLING C L, HAMMITT F G. A photographic study of spark-induced cavitation bubble collapse [J]. Trans ASME D J Basic Engng, 1972, 94: 825-833.
- [41] LAUTERBORN W, BOLLE H. Experimental investigations of cavitation-bubble in the neighbourhood of a solid boundary [J]. J Fluid Mech, 1975, 72: 391-399.
- [42] VOGEL A, LAUTERBORN W. Time-resolved particle image velocimetry used in the investigation of cavitation bubble dynamics [J]. Applied Optics, 1988, 27(9): 1869-1876.
- [43] VOGEL A, LAUTERBORN W. Acoustic transient generation by laser-produced cavitation bubbles near solid boundaries [J]. J Acoust Soc Am, 1988, 84(2): 719-731.
- [44] KUCERA A, BLAKE J R. Computational modeling of cavitation bubbles near boundaries in computational techniques and applications [C] // CATC-83 Ced Noyce. North-Holland: [s. n.], 1988: C391-400.
- [45] ZHOU Y F. Optimization of pressure waveform, distribution and sequence in shock wave lithotripsy [D]. [S. l.]: Department of Mechanical Engineering and Materials Science Duke University, 2003.
- [46] GAITAN D F, CRUM L A J. The dynamic process and cavitation luminescence of transient single acoustic cavitation bubbles [J]. Acoust Soc Am Suppl, 1990, 87: S141.
- [47] YOUNG J B, NELSON J A, KANG W. Frontiers of nonlinear acoustics [J]. Phys Rev Lett, 2001, 86: 2673.
- [48] TALEYARKHAN R P, WEST C D, CHO J S, et al. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation [J]. Science, 2002, 295: 1868.

Cavitation in ESWL

CHEN Jing-qiu, DENG Ting, TIAN Zu-an

(College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Cavitations are not only the dominant mechanisms of the stone comminution in ESWL but also the leading factors for the tissue injury. This conclusion has been shown by the theoretical analysis, the numerical simulation, the experiments in vivo and in vitro and the practice of the clinic. This paper summarizes the development in the field of the cavitation in ESWL, which lays the foundation for the further study of the ESWL. There are many difficulties and challenges in the research of the ESWL which needs further study in the theoretical field, the innovation for the numerical methods, the amelioration for the experiment technology and a lot of serious clinic practices. Compared with the theoretical analysis and the experiment technology, numerical simulation is an economical and safe method for the research of ESWL.

Key words: ESWL; cavitation; numerical simulation

(编辑 李胜春)