

文章编号: 1000-582X(2002)12-0114-05

现代医学手段诱发空蚀的形成及其影响

李玉兰^{1,2}, 陈景秋^{1,2}

(1. 重庆大学生物力学与组织工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学工程力学系, 重庆 400044)

摘要:空泡在随液体流动过程中,当周围压力增加时,空泡体积将急剧缩小或溃灭。由于空泡溃灭过程发生于瞬间,因而在局部将产生极高的瞬时压强,当空泡溃灭发生在固体表面附近时,不断溃灭的空泡所产生的极高压强的反复作用,将破坏固体表面。对生物医学工程中的空泡和空蚀现象的形成、发展和溃灭过程及其危害,空蚀破坏机理及其影响因素,空泡演化过程的数值模拟研究等进行了综合论述,提出了研究空蚀损伤现象需要解决的几个重要问题,为进一步深入研究和应用空化空蚀现象打下基础。

关键词:空泡现象;空蚀机理;数值模拟;医学应用

中图分类号: Q66

文献标识码: A

关于空穴和空蚀的研究涉及到生物医学、水利、石油化工、力学等领域^[1]。对于空蚀现象,一般把液体内部局部压力降低时,液体内部或液固交界面上蒸汽或气体的空穴(空泡)的形成、发展和溃灭的过程,叫做空化(Cavitation)^[2]。空泡在随液体流动过程中,遇到周围压力增加时,体积将急剧缩小或溃灭。由于空泡溃灭过程发生于瞬间(微秒级),因而在局部产生极高的瞬时压强,当溃灭发生在固体表面附近时,流体中不断溃灭的空泡所产生的极高压强的反复作用,破坏固体表面,这种现象称为空蚀,又称气蚀^[3]。对空化和空蚀现象的认识和研究,早在1753年, Euler 就注意到,水管中某处的压强若降低到负值时,水即自管壁分离,而在该处形成一个真空空间。1839年 Besant 及 1873年 Reynolds 开始在实验室对空化进行研究,1917年 Rayleigh 比较系统地提出了空化理论,建立了描述自由空泡运动的方程。在此基础上, Plesset 进一步研究得到了著名的 Rayleigh-Plesset 方程,形成了空泡动力学的基础。进入20世纪,随着科学技术的发展和实验测试手段的进步,船舶、水利、水电、石油、生物医学等部门的许多学者对空化和空蚀机理进行了广泛的研究,对空化起始、空泡测试、空泡动力学、空化影响因素、空蚀强度、材料抗蚀性等的研究取得了大量的成果^[4-6]。

液体中空泡的动力学行为与空化现象及水下噪声

机理密切相关,但由于液体中空泡的演化是一个非常复杂的物理过程,具有很强的非线性及非定常性,最初,对空泡在液体中的演化及辐射噪声只从定性^[7]、实验^[8-10]和基于球泡假设的 Rayleigh 方程^[11]等方面着手,20世纪70年代后,开始利用边界积分方程^[12-13]来模拟空泡的演化过程,该方法得到的空泡演化过程与实验观察的情况相吻合。而对空泡辐射噪声的研究还是通过 Rayleigh 方程确定空泡的体积变化,再通过声学方程简化将噪声与空泡体积变化相联系^[14],在确定体积变化中,利用了与实验观察到不相吻合的球形泡假设,结合上述工作,先利用边界元方法得到空泡的演化情况,求出演化过程中的体积变化,再利用声学方程在特殊情况下的解计算空泡的辐射噪声,进而研究壁面、泡中心与壁面的距离及泡内空气对空泡演化情况及所辐射噪声的影响。

1 生物医学工程中的空蚀现象

空泡现象涉及到生物医学工程领域中的应用安全问题,成为当前的研究热点之一。在 ESWL (Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy) 中冲击波经反射后出现的负压力,随着聚焦逐渐加强,最后达到 -4.0×10^6 Pa。这种负压力是拉力,这时候必然出现空化现象,在临床碎石时出现的大量气泡正是这种结果^[1]。

· 收稿日期: 2002-08-12

基金项目: 教育部重点科技资助项目; 高等学校重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介: 李玉兰(1965-), 女, 重庆人, 重庆大学副教授, 博士研究生, 从事材料力学、复合材料力学和生物力学的教学和研究工作。

不仅是ESWL,近年来其他现代医学手段的应用中也出现空化现象。在人体超声波诊断或治疗时,超声波可能会引起人体体液中形成空化,其副作用在国内外已引起注意。超声空化是强超声在液体中引起的一种特有的物理现象,是一个典型的非线性声学问题。理论上讲,纯净的液体分子结合力很强,因而具有极高的抗拉强度。但通常的实际液体,因种种原因而混入一些微小气泡,构成液体中的“薄弱环节”。当交变声压形成的负压足够强时,液体将首先在这些薄弱环节处被拉开,从而形成空腔并长大。而在随后的正压作用下,空腔将被压缩而快速闭合。这种气泡随超声频率迅速运动和重复发生的过程称为超声空化。液体中存在的微小气泡称为“空化核”。液体产生空化所需要的最低声压或声强幅值称为“空化阈”。目前先进的ESWL碎石机常采用超声波定位结石,增大了空化发生率。超声治疗主要利用超声波的空化作用,即在液体内当拉力超过内聚力时,微泡迅速形成,瞬间产生巨大冲力,撞击邻近表面,同时伴有局部高温、高压、发光、发电现象。

激光聚焦也会激发液体产生空泡。近年来在眼科手术中应用激光进行虹膜切除、虹膜打孔及白内障切除等,其机理是将高能激光脉冲聚焦在需切除的生物组织上,焦点区域被击穿而产生等离子体,该等离子体迅速膨胀产生的冲击波和声波形成巨大的压力梯度,利用该压力梯度达到撕裂生物组织的目的。强激光与物质相互作用时,物质吸收激光能量温度升高进而产生熔化,熔化的物质继续吸收光能产生汽化,部分汽化的物质在激光的作用下通过多光子吸收等过程产生离化的自由电子,离化的自由电子和电离态的离子及原物质的混合物对激光的吸收系数高达85%以上,于是经过一个“雪崩”式的击穿过程产生高温等离子体。等离子体的产生具有一定的阈值条件,当激光功率密度高于阈值时即产生等离子体,由于等离子体与周围介质之间很高的温差与压差,等离子体的迅速向外扩张形成“空化汽泡”^[15]。同时,空泡具有一定的能量,当其扩张到一定程度时就会破裂而消失。空泡破裂时能量转换,发出声音,产生冲击波。高温等离子体迅速向外扩张形成的冲击波会对周围介质产生机械冲力作用,当这种冲力超过物体的弹性限度时,物体便要受到破坏;另外,周围介质对等离子体扩张的限制反过来又促进了等离子体冲击波对物质的破坏。激光碎石就是利用激光与结石相互作用产生的等离子体冲击波击碎结石的。

气泡在压缩-闭合阶段,由于受到液体中静压力

P_0 ,正声压幅值 P_m 和液体表面张力 $2\sigma/R$ (σ 为表面张力系数, R 为气泡半径变量)的共同作用,泡壁闭合速度将愈来愈大,在完全闭合前的瞬间,可超过泡中气体的声速。此时泡内因急剧压缩形成电离、高温、高压等极端条件,引发放电、发光等现象,泡外液体也不能再看作是不可压缩。气泡闭合后,其集聚的动能便以冲击波的形式向液体中辐射出来,导致一系列物理效应。

由于临床碎石时往往需要放电轰击几百次甚至上千次,正负压力(即压力和拉力)的峰值反复交替作用不仅粉碎了结石,而且也必然损伤人体受到拉压作用的那些组织。另外,空化形成的气泡在液体与组织界面处坍塌时将发生向气泡外的射流,其速度可以高达120 m/s,腐蚀力很大。这可解释为聚焦冲击波引起人体组织损伤的一种原因。由于胆汁比软组织更接近于水的力学性能,冲击波会聚过程在胆汁中更易产生气泡进而发生空蚀,这也可以解释为什么聚焦粉碎胆石比粉碎肾石更容易发生重大伤害。据文献报道ESWL产生的气泡还可能造成血管栓塞^[16]。激光手术中等离子体产生的冲击波对生物组织有明显的影晌,等离子态膨胀后将产生空泡,空泡溃灭辐射的声压对生物组织产生副作用^[17]。此外,超声诊断是否对子宫中的胎儿发育发生副作用的问题,曾在英国公众中引起关注,因为超声波作用于血管时能激起血液中微小气泡振动从而导致红血细胞的聚集。超声波照射及其引起的空穴也可能改变细胞的排列、形状及其内部组成部分。又例如,使用超声波去除牙结石时是否会对健康牙齿表面发生空蚀,等等。这些例子都说明了关于空化和空蚀的研究在生物医学工程中的重要性。

空蚀产生破坏力的原因,是微射流理论。空穴坍塌时形成一股射流冲击邻近的固壁,Kling^[9]利用每秒25万张的高速摄影估算出在空穴内外压差为101 kPa时,微射流速度为33.4 m/s。另一种理论认为空穴坍塌时产生很强的压缩冲击波。还有认为是高温所致。但是正如Batchelor所说其机理尚未清楚,特别是最近ESWL和医用超声在人体体液中引发的空泡因其事关重大而亟待研究。

2 空蚀破坏机理及其影响因素

2.1 空泡的演化与溃灭

空泡的演化包括初生、膨胀发育至最大,而后压缩至溃灭等过程,该过程亦称为空泡的生命周期^[18]。空化过程中空泡的发育和溃灭都会产生强烈的空化噪声,尤其是在空泡的溃灭阶段,它所辐射出的声压可达一甚至数十个MPa,从而对周围产生很大的影响。

水中空泡的空化噪声具有与一般水流流动噪声不同的特性^[19]:1) 空泡在形成和发育阶段的声辐射较弱,空泡声辐射能量集中在空泡溃灭阶段,为空泡势能的30%~50%;2) 单空泡和群空泡的频率特性大致相同。群空泡的声辐射功率等于单空泡辐射能量的平均值与每秒溃灭空泡数的乘积;3) 空泡噪声频率随空泡增大而降低。空泡噪声在30 kHz以上明显增大,最大声辐射强度的频率一般低于400 kHz;4) 压力、流速及含气量对空泡声辐射有影响。在恒定压力(流速)下,随着流速(压力)的改变,空化噪声存在极值。改变压力、流速或物体形状,可在较大程度上改变空化噪声的频谱和强度。

2.2 空蚀破坏机理

固体壁面产生空蚀破坏的机理有机械作用、化学腐蚀作用、电化学作用和热作用等。其中较公认的是机械作用为主^[3-5]。

2.2.1 机械作用

过流壁面产生空蚀破坏是由于空泡溃灭时产生微射流和冲击波的强大冲击作用所致。Hammit^[10]通过计算和实测得出,游移型空泡溃灭时,近壁处微射流速度可达70~180 m/s(有人认为可高达600 m/s),在物体表面产生的冲击压力可高达140~170 MPa(有的计算高达582 GPa),微射流直径约为2~3 μm,表面受到微射流冲击次数约为100~1000次/(s·cm²),冲击脉冲作用时间每次只有几微秒,这样高的冲击作用将直接破坏物体表面而形成蚀坑,较小冲击力的反复作用则引起物体表面疲劳破坏。

2.2.2 化学腐蚀作用

一般说来,化学腐蚀作用常与机械空蚀作用互相促进,空蚀加速腐蚀,腐蚀也加速空蚀,二者联合作用造成固壁更严重的破坏。

2.2.3 热力作用

空泡溃灭时,其中含有的气体温度很高(估算达数百度),这些热气体与物体表面接触时,将使物体表面局部加热到熔点,使局部强度降低而破坏。

2.2.4 电化学作用

在空泡溃灭时的高温高压作用下,金属晶粒中形成热电偶,冷热端间存在电位差,对金属表面产生电解作用,造成电化学腐蚀。

2.3 影响空蚀程度的因素

由于空蚀是一个非常复杂的物理过程,影响空蚀程度的因素较多,目前还没有一个比较成熟的定论,现仅将有关研究结果进行总结。

2.3.1 液体介质的影响^[5]

液体的物性对空蚀程度有影响:1) 在水、苯等4种液体中,用铝试件所做的空蚀试验表明,当蒸汽压强相同时,空蚀量几乎相同;2) 表面张力将加速空泡的压缩过程,当空泡溃灭时,液体的表面张力愈大,空泡溃灭的压强也愈大,相应地其所造成的空蚀破坏也愈严重;3) 液体粘性对空泡的溃灭速度有明显的减慢作用,粘性愈大,空泡溃灭过程愈缓慢,溃灭压强也愈小,因而空蚀破坏减轻;4) 当液体密度增加、压缩性减小时,空蚀破坏有加重的趋势,试验得出,空蚀破坏量与液体中的音速和密度的乘积之间存在指数关系。

此外,天然水中含有大量的微粒和未溶解的微气泡,极易构成细小的水气相间的分界面,从而为空化产生提供了条件^[3]。

2.3.2 水流压强、流速和含气量的影响

研究表明^[11],当下游压强一定时,空蚀程度随试件位置上游压强的增加而增加,当上游压强固定时,空蚀程度随下游压强的增大而出现一最大值。

Knapp的试验结果表明^[5],材料的空蚀程度 I 与水流流速 v 间存在下列关系:

$$I = Av^n$$

式中, A 为试验常数;指数 n 依试验条件不同在一定范围内变化,在Knapp的试验中 $n = 6$ 。

在一定范围内,水中含气量愈高,空蚀破坏的能力愈大;当水流中含气量大到一定程度(>3%)后,含气将改变水流物性,使空蚀破坏减弱,甚至可以完全避免^[11]。这种现象在水工水力学上称为“掺气减蚀”。

2.3.3 材料性质的影响^[20-21]

材料表面硬度较高时,抗空蚀能力强;结晶粒度愈细,抗空蚀性能愈好。表面有致密而坚固的表面膜层时,可大大延缓空蚀破坏的发展过程。材料的粗糙表面对空化的发生有促进作用,表面光滑会推迟空化的发生并使空蚀减轻。

2.3.4 温度的影响

Plesset的研究表明^[22],水温低时,水中含气量高,对于空泡溃灭的缓冲作用加大,空泡溃灭压强减小。温度上升后,由于气体含量减少,缓冲作用也减弱,空泡溃灭压强加大,空蚀破坏加剧。但当水温较高时,饱和蒸汽压强也加大了,这又使空泡的溃灭压强有所降低。

2.3.5 物体尺寸和距离的影响

当绕流物体尺寸较大时,游移型空泡有充裕的时间膨胀,故溃灭时放出的能量也较大,因而空蚀破坏也更严重。理论和实验均证明,在一定条件下,空蚀程度与绕流物体线性尺寸的立方成正比^[23]。

物体空蚀程度与距空泡中心的距离关系极大,只有那些在物体表面附近溃灭的空泡才能对物体表面产生破坏。一般认为,距空泡中心为 3 倍空泡直径的距离内,空泡溃灭压力可使表面破坏;超过此距离,空蚀破坏能力大大降低^[20]。

3 空泡演化过程的数值模拟

由于医学应用中的安全问题及声化学机理的研究,空泡现象成为当前研究的热点之一。冲击波碎石、超声治疗及超声诊断、激光的应用可能在生物体内产生空泡和产生自由基 OH 离子,因而导致机械损伤和引起化学及生物效应。目前,在生物体内直接观察和测量空泡现象较为困难,大部分实验研究工作是在玻璃试管中进行。因此,采用数值模拟技术研究生物体内的空泡现象,就具有十分重要的理论价值,同时对在医学中的应用亦具有重要的指导意义。

关于空化现象的数值模拟研究,国内外已有不少文献发表^[19-24],如高频反应器中超声波诱发的空泡动力学的数值模拟,应用分子动力学模拟方法研究空泡在一元和二元分子系统中的形核问题;应用 Free-Lagrange 方法模拟水中冲击波产生的空泡溃灭现象;应用球形空泡的非牛顿动力学模型研究水中和血液中单个空泡的行为;结合流体体积技术和空泡动力学模型预测空泡的生长和溃灭过程,将非线性连续空泡混合方程与 Rayleigh-Plesset 方程耦合,应用 Lagrange 积分方法求解^[24],等等。在生物医学工程领域,文献 [1] 采用高速气体动力学方法对 ESWL 过程中空泡的产生和发展过程进行了数值模拟,其结果表明水中冲击波反射聚焦时出现空化是不可避免的。除此之外,对空蚀造成的人体组织的损伤的研究,目前尚未见有深入的研究。工程中对气蚀问题常用的估值方法对人体组织来说是过于粗糙了,对生物医学工程领域的空蚀损伤现象,首先需要解决以下的重要问题。

- 1) 空蚀造成人体组织损伤的作用机理;
- 2) 空泡溃灭发生向外的射流的流场分布及其随时间的演变规律;
- 3) 空泡溃灭产生的应力场分布及其随时间的演变规律;
- 4) 在空泡应力的作用下,人体组织的应变响应及其演变规律,以及发生空泡损伤的临界条件;
- 5) 空泡溃灭引起的温度场变化及其对空泡损伤的影响规律;

运用数值模拟方法对上述问题进行研究,进而建立空泡溃灭及损伤的力学模型,确定空泡损伤过程的

控制参数。

4 结束语

目前,国内外对空化和空蚀机理及其影响因素的研究已取得很大进展,并在许多领域如船舶、水利、水电设施、机械和生物医学工程领域得到了应用。但是,由于空化和空蚀是微观、瞬时、随机、多相的复杂过程,现有的理论及成果远不够完善,许多问题还有待进一步深入研究和探索。特别是在生物医学工程领域,近年来各种现代医疗设备和手段的普遍应用,一方面提高了医疗技术水平,同时也产生了新的问题有待研究和解决。考虑到生物组织的复杂性和敏感性,对于关系人体生命的空蚀现象,在 ESWL、激光手术、超声波照射等情况下,需要进一步模拟气泡在界面处的坍塌过程中发生空蚀,模拟在皮肤、胆囊和胆管等人体组织可能发生的空蚀的力学机理,深入了解空蚀对人体组织的损伤机理,由于受当前实验技术水平的限制,数值模拟是深入研究人体组织空蚀机理的可行而安全的选择。可以预见,借助于流体显形和数值模拟等先进的研究方法和手段,以及数据处理技术的进步,随着空化空蚀机理和空化射流研究的进一步深入,各种先进的医疗设备和技術将得到更加广泛的应用,亦更加安全和可靠,产生显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 陈景秋,王宗笠. 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.
- [2] 潘森森. 中国大百科全书(力学卷)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985. 273-274.
- [3] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [4] 刘小兵. 空泡在任意流场中的运动研究[J]. 水动力学研究与进展, 1994, 9(2): 150-162.
- [5] KNAPP R T. Cavitation[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1970.
- [6] 张有敬. 空泡机理研究进展[J]. 高压水射流, 1984, (2): 9-13.
- [7] FITZPATRICK H M, STRASBERG M. Hydrodynamic source of sound[A]. Proc 1St Symp on Naval Hydrodynamics[C]. Washington D C: National Academy Press, 1956. 241-280.
- [8] JONES I R, EDWARDS D H. An experimental study on the forces generated by the collapse of transient cavities in water[J]. J Fluid Mech, 1960, 7: 596-609.
- [9] 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.

- [10] LAUTERBORN W, BOLLE H. Experimental investigations of cavitation-bubble in the neighbourhood of a solid boundary[J]. J Fluid Mech, 1975,72:391 - 399.
- [11] RAYLEIGH J W. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. J Philos Mag, 1917, 34: 94 - 98.
- [12] BLAKE J R, GIBSON D C. Growth and collapse of a cavity near free surface[J]. J Fluid Mech, 1981, 111:123 - 140.
- [13] BLAKE J R, GIBSON D C. Cavitation bubbles near boundaries [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1987, 19:99 - 123.
- [14] 罗斯著.水下噪声原理,第 111 卷[M].水下噪声原理翻译组译.北京:海洋出版社,1981.123 - 140.
- [15] 孙永道,赵卫,杨斌洲.激光感应等离子体冲击波碎石[J].物理,1998,127(5):30 - 33.
- [16] 杨桂通.医用生物力学[M].北京:科学出版社,1994.
- [17] 戚定满,鲁传敬,何友声.单空泡溃灭辐射噪声的实验研究[J].声学学报,2000,23(6):532 - 536.
- [18] 田立言,丁彤,陈嘉范,等.挟沙水流中空泡溃灭的实验研究[J].水力发电学报,1999,19(1):68 - 73.
- [19] 黄景泉.空化噪声的实验研究[J].水动力学研究与进展,1988,3(4):8 - 15.
- [20] 黄继汤.挟沙水流中混凝土等脆性材料及一些金属材料抗空蚀性能的试验研究[A].1983 年全国水电中青年科技干部报告会论文选集[C].北京:水利电力出版社,1985.198 - 206.
- [21] 杨志明.初生空化的对比试验中德合作研究项目[J].水动力学研究与进展,1994,9(1):96 - 103.
- [22] PLESSET M S. Temperature Effects in Cavitation Damage[J]. Trans ASME J Basic Engr, 1972,94:52 - 58.
- [23] 裴拉耶夫著.水轮机气蚀[M].华中工学院水力机械教研室译.北京:机械工业出版社,1981.
- [24] PARK S, WENG J G, TIEN C L. Cavitation and bubble nucleation using molecular dynamics simulation [J]. Microscale Thermophysical Engineering,2000,4(3):161 - 175.

Formation and Influences of Cavitation Induced by Modern Medical Technologies

LI Yu -lan^{1,2}, CHEN Jin-qiu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Biomechanics and Tissue Engineering under the State Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: When bubbles flow within fluid, once the pressure around a bubble decreases, the volume of bubbles become smaller or collapses. Since the collapse of a bubble takes place in very short time, a localized high pressure will be induced. With the continuous collapses of bubbles near a solid surface, the induced high pressure will produce damages on the solid surface. In this paper, the formation, development and collapse processes of cavitation bubbles produced in biomedical engineering, the damage mechanisms of cavitation and influencing factors are reviewed. The numerical simulation study of cavitation bubble evolution process is discussed and finally, a number of problems to be solved in the cavitation study are presented, which is considered as a basis to the study and application of cavitation phenomena in biomedical engineering.

Key words: cavitation phenomena; cavitation mechanism; numerical simulation; medical application

(责任编辑 李胜春)