

液体介质中的空泡发光现象及其他*

李玉同 张杰

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 空泡广泛存在于自然界中.理论和实验表明,空泡在坍塌时可以将能量密度提高 $\sim 10^{12}$ 倍,发出皮秒级超短脉冲闪光.文章对液体介质中的空泡规律和常用研究方法进行了描述,主要内容包括空泡动力学、声致发光、冲击波产生、激光空泡及空泡应用前景介绍.

关键词 空泡,声致发光,激光空泡

PHYSICAL PHENOMENA RELATED TO SONOLUMINESCENCE OF BUBBLES IN LIQUIDS

LI Yu-Tong ZHANG Jie

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract Bubbles exist widely in nature. Experiments and theory show that during the collapse of a cavitation bubble the input energy density is concentrated by twelve orders of magnitude, and a flash of light on the order of picoseconds is generated. This paper describes the bubble phenomena in liquids and common methods of investigation. Bubble hydrodynamics, sonoluminescence, shock waves, laser-induced bubbles and various application prospects are presented.

Key words bubble, sololuminescence, laser bubble

1 引言

自然界有许多空泡现象,比如一滴水落到水面上形成的水泡,啤酒瓶中的空泡等.当这些空泡破裂时,人们不会感到惊奇.但如果有一天你发现一个空泡破裂、坍塌时,其中心温度高达几万摄氏度,不依赖任何仪器就可以看到闪光,而且还会产生上万大气压的冲击波,你一定会惊讶不已,感叹造物主的神奇.

对空泡发光现象的研究可以追溯到上世纪20年代的第一次世界大战时期.德国的科学家在使用扬声器进行声纳实验时发现一个有趣现象,强声波场对溶液中的化学反应具有催化作用. Heidelberg大学的科学家 Reinhard Mecke 指出,激发化学反应所需的能量应该可以激发原子发光,并让人开始这方面的研究. 1934年, Cologne大学的 H. Franzel 和 H. Schultes 在外加声波的作用下,在水中发现了声致发光现象,成功地地将声能转化成了光能.

下面这几个数字会让我们感到非常吃惊,液体中的一个气体空泡可以将声波能量会聚到亚微米空间,强度提高超过 10^{10} 倍,进而激发出脉宽短到几十

皮秒的闪光,空泡的坍塌速度可以超过声速,在最小半径处的加速度高达 $10^{11}g$ (g 为重力加速度)^[1,2].

面对这些令人惊讶的数字,人们不禁要问,小小的空泡为什么能发光?其内部温度到底能达到多高?在这些问题的驱使下,近年来科学家们对空泡进行了广泛研究,但到目前为止,仍然未能较好地解决诸如空泡发光机制等基本问题.

空泡广泛存在于固体、液体、气体中.液体中的空泡可以用声波场、激光脉冲、放电、流场等多种办法得到.最普遍的方法是利用声波场来研究空泡.按照空泡的数目,可分为单空泡系统和多空泡系统.在实际应用和实验室中,对多空泡系统的研究已经有了几十年的历史,积累了大量数据,其主要研究内容包括声致发光、空泡表面振荡和射流、冲击波、化学反应,以及空泡与声波场、周围物体、其他空泡的相互作用等.但是要搞清楚多空泡复杂系统,有必要先对其基本单元——单空泡系统进行研究,这一基本法则已经在许多物理研究中取得成效.利用声波场捕获技术可以产生单个空泡.激光空泡具有更丰富多采的特点,所以近年来也有人进行研究.本文主要

* 2001-08-23收到初稿,2001-10-17修回

介绍这两种方法产生的单空泡系统.

2 声致空泡

在声波场中产生稳定的单空泡实验装置主要由三部分组成:液体容器、换能器和初始气泡注入设备.换能器的作用是把周期性电信号(一般为正弦波)转变为周期振荡的声波,其频率要和容器的固有频率相匹配.初始气泡被注入充满液体(一般是水)的容器后被声波场捕获,在声波场的作用下,形成半径随时间振荡的稳定空泡.这种声学空泡可以振荡很多周期,持续时间可达几个小时.

图1是实验所测的一个声波周期中空泡的主要物理量变化过程^[2].图1中的曲线a是距空泡1mm的水声传感器记录的声波强度随时间的变化过程,曲线b是采用Mie散射法(后面介绍)得到的空泡半径随时间的变化,曲线c是光电倍增管所测空泡闪光信号随时间的变化.外加声波场的稀疏变化迫使空泡做脉冲式振荡.在稀疏的波腹区,压力为负,空泡从声波场中吸收能量,由半径几微米的平衡态膨胀到几十微米大小.之后在正声压的作用下,空泡迅速以超声速收缩(坍塌),直到和内部气体间的范德瓦耳斯力平衡,空泡半径达到最小,同时发出闪光(对应曲线c的尖峰).曲线a的小尖峰是空泡坍塌时产生的强冲击波造成的.空泡坍塌后,经过几次反弹,然后静止下来,等待下一周期声波场的激发.图1所示的冲击波尖峰比闪光尖峰稍晚的原因是,冲击波产生后,从空泡传播到水声探测器需要一段时间.

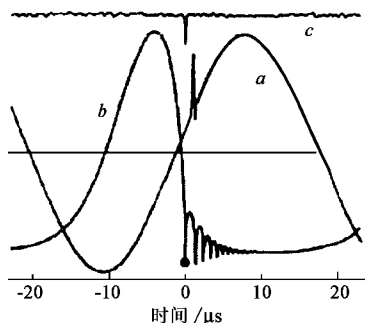


图1

曲线a为在距离空泡1mm处测得的声波振幅随时间的变化(尖峰是空泡坍塌时产生的冲击波);
曲线b为一个声波周期中空泡半径随时间的变化;
曲线c为一个声波周期中闪光强度随时间的变化

对空泡行为有了一个初步的了解之后,下面我们对空泡动力学、闪光和冲击波进行一些讨论.

2.1 空泡动力学

对空泡观测的难度主要来自空泡物理量的时空剧烈变化.比如:声致空泡在声波场中吸收能量,膨胀到最大半径的时间约为几十 μs 量级,但坍塌发光时间可短到几十ps;在空间上,声致空泡最大半径 $\sim 50\mu\text{m}$,最小半径可和可见光波长相比拟($\sim 0.5\mu\text{m}$);激光空泡的时空跨度更大.这就要求探测器既要有很大的动态范围,还要有极快的时间响应.

空泡动力学主要是指空泡半径随时间的变化[即 $R(t)$ 曲线],也包括空泡劈裂、射流等现象. $R(t)$ 曲线是表征空泡的基本物理参数,主要的诊断方法是Mie激光散射法和直接成像法.

Mie散射法是研究空泡动力学的有力工具^[3-6].当一束宽度大于空泡半径的激光束照射空泡时,在侧面用倍增管等光电探测器可测到空泡对激光束的散射光.采用严格的Mie散射理论比较繁琐,在近似情况下,可以认为散射光强度和空泡半径的平方成正比.如能知道空泡在某一时刻(比如最大时刻)的半径,就可得到完整的 $R(t)$ 曲线.图1中的空泡半径随时间变化曲线b就是采用Mie散射法得到的.

直接对空泡进行光学显微成像^[7],可得到空泡某一时刻的半径.如果能连续采集,也可得到 $R(t)$ 曲线.对于非球对称的空泡,此法比Mie散射法优越,因为散射法测量空泡半径只适用于球对称情况.

在研究激光空泡与固体边界相互作用中,直接成像法起了重要作用.对于自由空泡,一般为球对称膨胀和坍塌.但空泡周围有固体边界时,空泡动力学过程将呈现出非对称特点.图2给出了两种情况的比较^[8],其中(a)图是自由空泡情况,中心亮斑为空泡发光区;(b)图为空泡下方有固体边界的情况.对于后者,空泡收缩时,由于边界对水流的阻挡作用,空泡下表面的向心加速度比上表面加速度小,导致空泡上表面出现凹陷,产生一个向固体边界的附加流动.按照动量守恒,整个空泡在坍塌过程中有向下的加速移动.坍塌过后,空泡的反弹膨胀将伴有向边界的射流出现,使空泡出现凸起.

大多数文献中都采用Rayleigh-Plesset方程来描述空泡动力学行为^[9,10],这里不再赘述.

2.2 声致发光(SBSL)

人们把声致空泡的发光称为声致发光(sololuminescence),其原因是空泡将声波能转变为光能.典型的声致发光单脉冲光子数为 10^5-10^7 个,方向为各向同性,发光强度与声场振幅、环境温度、外部压力、溶解在溶液中的气体种类和杂质有关.实验中可以

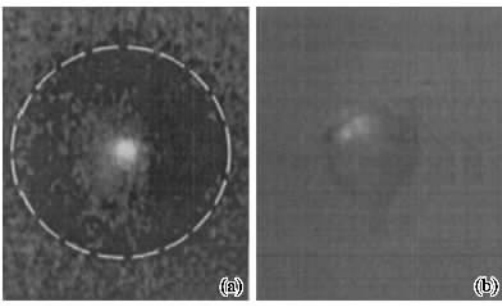


图2 固体边界对空泡动力学的影响

(a)自由空泡的球对称坍塌 (b)下方有固体边界,空泡下方出现凸起

使用光电倍增管监测声致发光信号,但由于空泡发光持续时间(脉宽)非常短,光电倍增管的时间分辨本领不够高,所以得不到声致发光的准确脉宽。目前主要采用条纹相机^[6]和时间相关单光子计数法^[11,12]研究发光脉宽和波形。图3为时间相关单光子计数法测得的声致发光脉冲波形^[11]。脉冲波形近似为高斯分布,在所列出出的实验条件下,发光脉宽138ps。实验还发现声致空泡的闪光持续时间与波长无关,这表明声致发光可能来自中心的冷等离子体区^[12]。对于空气空泡,发光脉宽小于50ps,如此短的光脉冲目前只有激光器才可能做到。

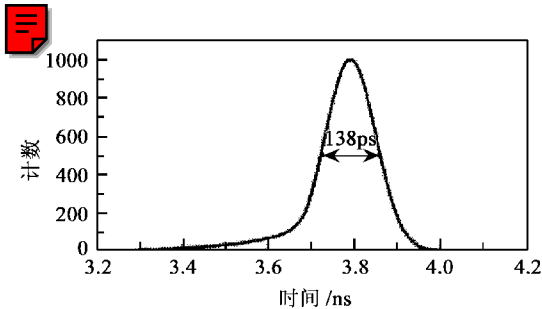


图3 声致发光脉冲波形

(实验条件为声波驱动压强1.2大气压,温度22℃,O₂丰度1.8mg/l)

图4是声致单空泡的发光谱^[12]。很明显,声致单空泡发射谱是没有分立谱线的宽带连续谱,范围从紫外到红外。由于水对高于6eV能量的光子吸收非常强烈,所以实验上无法探测到更高能量的光子。6eV的光子能量对应温度约72000K,这表明空泡发光区域处于高温高压状态。空泡能发出的最大光子能量、紫外区域的谱分布到目前仍是一个谜。

空泡发光光谱表明,空泡发光区域为一热斑。黑体辐射、韧致辐射和化学发光都可以产生连续谱。为了解释空泡高温高压区的形成,一个普遍接受的模

型是冲击波压缩发光模型^[13-15]。这一模型的主要过程是坍塌过程中的空泡产生了内向冲击波,冲击波向心传播时,对所经过的气体进行加热。到达中心后,冲击波反弹向外传播,使气体再一次被加热,温度高到可以使气体电离,逃逸的电子和离子碰撞而发光。这一模型较好地解释了声致发光的主要特征,例如,所有气体种类的空泡都是宽带谱,不同波长的闪光脉宽基本相等等。另一种值得注意的单空泡发光机制是考虑了空泡中气体电离的等离子体模型。Moss等人将电离过程看成是局域平衡过程,采用电离度的经验公式,较早地考虑了空泡气体的电离现象^[16,17]。Xu等人将等离子体模型进一步发展,用电离、复合的速率方程来细致地描述空泡中等离子体的演化过程,得到较好结果^[18,19]。

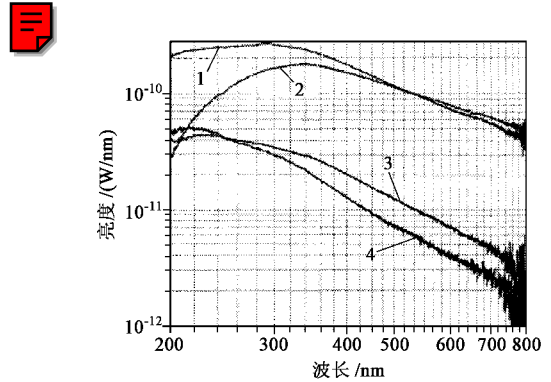


图4 典型声致发光光谱

- 1 为 N₂ 气氛(含1% Xe)和150 Torr 气压下的发光谱;
- 2 为 Xe 气氛和3 Torr 气压下的发光谱;
- 3 为 Ne 气氛和3 Torr 气压下的发光谱;
- 4 为 He 气氛和3 Torr 气压下的发光谱;

2.3 空泡产生的冲击波

空泡内爆时,除了发光之外,还会激发冲击波^[20]。可使用离空泡一定距离的水声传感器测量冲击波的时间变化。此方法时间分辨能力有限,而且不能对离空泡很近的冲击波进行直接测量。将激光散射法和条纹相机结合,可得到空泡坍塌最后阶段冲击波的高时间、空间分辨(一维)图像^[21]。一束激光入射到空泡上,空泡发出的冲击波波前在液体中形成强折射率梯度,此梯度将引起激光散射,用条纹相机观测散射激光信号,可得到冲击波信息。图5为实验测得的冲击波波前离空泡中心的距离以及冲击波速度随时间的变化。可见,在空泡半径最小时,产生了4000m/s的强冲击波,波速随时间逐渐减小,最后以声速传播。

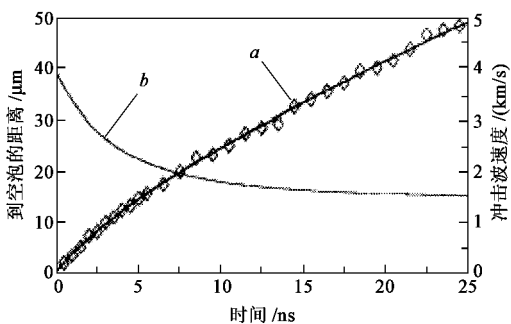


图5 冲击波传播距离(a)和速度(b)随时间的变化

3 激光空泡^[22]

激光空泡和声致单空泡是研究空泡单元——单个空泡的重要手段。和声致空泡相比，激光空泡的产生相对简单，拥有几 mJ 的 ns 激光器就可以进行空泡研究。

实验中要使用消像差透镜，以避免焦斑弥散。在焦点处，激光产生的极强电场会将液体介质击穿，形成雪崩电离，从而产生一个等离子体热斑，等离子体的膨胀形成空泡。和声致空泡类似，在实验上已经观察到激光空泡的发光和冲击波。

和声致空泡相比，激光空泡表现出更为丰富多彩的现象。由于激光空泡发光能量来源于激光，而不是声波场，为了和声致发光相区分，所以被称为单腔空泡发光(SCBL)^[8]。Baghdassarian^[23]等人研究了水中激光空泡动力学和发光随外部压力、溶解在水中的气体种类的关系。实验表明，激光空泡发光和声致发光有相似之处，比如都具有很快的时间过程，但也有不同之处。激光空泡发光基本和溶解在水中的气体种类无关，而声致发光则与溶解气体有关。还有一个更为有趣的现象是当施加到水上的压力增大时，激光空泡在坍塌时劈裂为两个空泡，而且两个空泡都各自发光(见图6)。

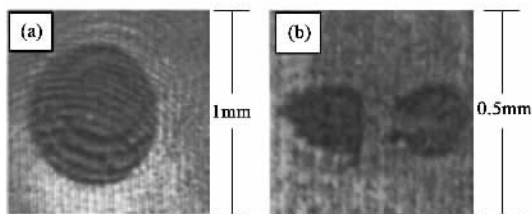


图6 外加压力 11bar 时，坍塌前激光空泡图像(a)和坍塌过程中空泡一分为二的图像(b)

激光空泡的发光谱也有自己的特点。最近已经发现^[24]，当空泡半径较小时，空泡发光谱为连续谱，

黑体辐射拟合温度约为 7800K；但对于半径较大的空泡，出现了 310nm 的 OH 分子带谱，这和声致空泡发光谱截然不同。在声致发光中，只有多空泡系统才能观察到 OH 带谱^[25]。这表明，激光空泡有可能将单空泡系统和多空泡系统联系起来。

由于激光参数的多样性和可调性，激光空泡现象非常丰富。激光空泡半径可以从几十微米到几毫米，而声致单空泡只能保持在几十微米左右，这为观测带来方便。激光空泡的产生完全摆脱了声波场，可以不考虑扩散不稳定性^[26]和 Bjerknes 力阈值的影响。激光空泡可以发出比声致发光高出至少一个量级的光子数。利用激光空泡，可以方便地研究非球对称空泡的动力学和发光等过程；系统地研究激光空泡的发射谱，有望建立单空泡和多空泡系统的联系；空泡与空泡之间的相互作用是理解多空泡系统发光的基础。通过调整两束或多束激光的焦点位置，可以方便地研究空泡与空泡之间的相互作用，所以激光空泡是研究空泡现象的有力工具。

4 空泡的潜在应用前景

空泡内爆时会形成极端物理条件，比如很高的温度(~ 10000K)，这为一些领域的科学研究提供了新舞台。空泡的应用之一是声化学研究。在多空泡系统中，空泡中发生化学反应是早已熟知的事实^[28]。空泡内爆高温超过了 H₂O, O₂, N₂ 等气体的离解温度，这些气体会离解为 H, O, N 等自由基，这些自由基又会组合成 OH, NO 等较大自由基。对于声致单空泡和激光空泡系统，内爆温度更高，空泡内部极可能成为化学反应的场所^[24, 29, 30]。如果能控制空泡内爆温度等参数，空泡可以作为化学反应研究的微反应器。

在激光惯性约束聚变研究中，人们一直在追求如何将充了氘氚气体的靶丸对称压缩而得到高温高密度等离子体，从而引发聚变反应。按照前面提到的声致发光冲击波模型，假定向内传播的冲击波能保持稳定的球对称性，当冲击波向心压缩到很小半径时，可以得到非常高的温度。美国的科学家曾建议采用空泡现象进行核反应研究，但目前的空泡压缩程度远不能满足聚变反应所需的条件。或许空泡现象为实现聚变反应提供了一条尝试途径。

在某些研究中，需要对空泡进行抑制，尽量减少空泡的产生。比如，在激光眼科手术中，激光形成的空泡及冲击波会带来副作用，此时就要尽量抑制空

泡.实验已经表明,空泡大小、冲击波强度和激光的脉宽有关,激光脉宽越短,空泡越小,冲击波越弱^[31],所以,在眼科手术中,采用短脉宽激光较好.

参 考 文 献

[1] Putterman S. *Physics World*, 1998, 5 : 38
[2] Barber B P, Hiller R A, Lofstedt R *et al.* *Physics Reports*, 1997, 281 : 65
[3] Barber P W, Hill S C. *Light Scattering by Particles :Computational Methods*. Singapore :World Scientific, 1990
[4] Barber B P, Putterman S J. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69 : 3839
[5] Weninger K R, Barber B P, Putterman S J. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78 : 1779
[6] Gompf B, Pecha R. *Phys. Rev. E* 2000, 61 : 5253
[7] Vogel A, Busch S, Parlitz U. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, 100 : 148
[8] Ohl C D, Lindau O, Lauterborn W. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80 : 393
[9] Rayleigh L. *Philos. Mag.*, 1917, 34 : 94 ; Plesset M. *J. Appl. Mech.*, 1949, 16 : 277 ; Prosperetti A, Lezzi A. *J. Fluid Mech.*, 1986, 168 : 457
[10] Lofstedt R, Barber B P, Putterman S J. *Phys. Fluids A*, 1993, 5 : 291
[11] Gompf B, Gunther R, Nick G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79 : 1405
[12] Hiller R A, Putterman S J, Weninger K R. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80 : 1090

[13] Wu C C, Roberts P H. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70 : 3424
[14] Barber B P. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, 96 : 3252
[15] Lofstedt R, Barber B P, Putterman S. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, 92 : 2453
[16] W C Moss *et al.* *Phys. Fluids*, 1994, 6 : 2979
[17] W C Moss *et al.* *Science*, 1997, 276 : 1398
[18] Xu N, Wang L, Hu X W. *Phys. Rev. E*, 1998, 57 : 1615
[19] Xu N, Wang L, Hu X W. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83 : 2441
[20] Joachim H, Matthias R, Andreas B. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81 : 5434
[21] Pecha R, Gompf B. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84 : 1328
[22] Lohse D. *Nature*, 1998, 392 : 21
[23] Baghdassarian O, Tabbert B, Williams G A. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83 : 2437
[24] Baghdassarian O, Chu H C, Tabbert B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86 : 4934
[25] Matula T J, Roy R A, Mourad P D. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75 : 2602
[26] Hilgenfeldt S, Lohse D, Brenner M P. *Phys. Fluids*, 1996, 8 : 2808
[27] Akhatov I, Mettin R, Ohl C D *et al.* *Phys. Rev. E*, 1997, 55 : 3747
[28] Suslick K S. *Science*, 1990, 247 : 1439
[29] Detlef L, Michael P B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78 : 1359
[30] Thomas J M, Lawrence A C. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80 : 865
[31] Noack J, Hammer D X, Noojin G D *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1998, 83 : 7488

·物理新闻·

冷反氢原子(Cold Antihydrogen Atoms)

最近欧洲核子研究中心(CERN)第一次在实验上产生了冷反氢原子,其中的正电子与反质子同时约束在一个由电磁场控制的捕集器中.

自然界中是可能存在着反粒子的,但数量极少.一定量的反质子可以在宇宙射线中观测到,而正电子都出现在天空中银河系内慧核的高能区域.如果说较多的反原子、反星系和反银河系能存在于宇宙中并观测得到的话,那么在正物质与反物质相互碰撞时,我们将会看到伽玛射线的强光灾变.但迄今为止,我们还没有观测到这样的辐射,所以科学家们认为,反物质只能用人工的方法来制造.

制造反氢原子是相当困难的,因为我们即使把正电子与反质子人为地引导到一起,由于它们相互间的快速运动,也极其难将它们形成中性原子.几年以前, CERN 和费米实验室在作强散射实验时曾得到过少量的热反氢原子,但由于它们的寿命太短,因此无法对其开展研究,但从反氢原子探测器上可以明确地证明它们的存在.

2002年2月,在美国波士顿召开的“美国科学促进年会”上,反氢原子捕集器协作组(Antihydrogen Trap Collaboration, ATRAP)的发言人,哈佛大学的 G. Gabrielse 教授指出,在 CERN 有几个实验组正致力于在可控制和可测试的容器中制造冷反氢原子,他们的目的是验证在物理学中对正常原子适用的规律(如重力、量子力学和相对论等)是否也适用于反原子.现在他们将 6MeV 的反质子进行慢化,使其温度降低到 4K,然后将它与冷电子相混合并收集到捕集器中;另一方面,将从钠-22 核中衰变出的正电子冷却后收集到捕集器的另一端.最后约有 300,000 个正电子与 50,000 个反质子相互接触并发生作用. Gabrielse 教授认为,在收集器中的正电子与反质子不会全部形成等离子体,有一部分将组成反氢原子.现在更多的诊断设备已经安装,预计在下个月将有新的研究成果可以公布.到今年秋季,一个更大型的和改进了的反氢原子捕集器可以安装完毕,那时可以让研究者们引进一些激光设备来研究处于捕集器内的反氢原子的光谱学特征.

(云中客摘自 Physical Web. Online 22 February 2002)