

氯化钠水溶液中多泡声致发光光谱的实验研究

陈瞻, 徐俊峰, 黄威, 陈伟中, 缪国庆*

南京大学声学研究所, 近代声学教育部重点实验室, 南京 210093

*联系人, E-mail: miaogq@nju.edu.cn

2007-10-13 收稿, 2008-01-21 接受

国家自然科学基金(批准号: 10434070)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20040284034)资助项目

摘要 实验研究了不同浓度、不同氦气含量氯化钠水溶液中的多泡声致发光光谱, 对其连续谱背景上出现的 310 nm 处的氢氧根离子光谱和 589 nm 处的钠原子光谱进行重点观察与比较. 发现在相同实验条件下, 钠原子光谱强度明显高于氢氧根离子光谱强度, 并且其对实验条件的改变更加敏感. 而氦气含量、氯化钠水溶液浓度及驱动声压也在一定范围内对光谱强度有较明显的影响.

关键词

声空化

声致发光

光谱

氯化钠水溶液浓度

氦气含量

驱动声压

当液体中存在由超声波产生的声场, 而这个声场的声压超过某一阈值时, 液体中会产生大量的气泡, 这种现象称之为声空化. 这些空化气泡将以与声场相同的频率进行非线性的膨胀与收缩. 当驱动超声波的声压进一步增大时, 这些气泡将发生急剧的塌缩, 在这一塌缩过程中气泡中发生复杂的物理化学变化并发光. 这种现象称为声致发光. 而这种由众多气泡产生的瞬态发光则称为多泡声致发光(MBSL). 20 世纪 70 年代, Young^[1]研究了溶有包括 5 种惰性气体在内共 17 种气体的水溶液的声致发光现象. 此后惰性气体含量对于 MBSL 的影响成为声致发光研究的一个重要方向. 20 世纪 90 年代初, Gaitan 等人^[2]首先在实验上实现了液体中单个气泡的稳定悬浮并发光, 称之为单泡声致发光(SBSL). 此后各国研究人员基于这一实验技术进行了一系列工作, 分别从使用的溶液的类型^[3]、气泡动力学的理论及实验^[4-6]、发光光谱^[7]等方面着手, 发现了许多有趣和有价值的现象, 使得声致发光逐渐成为物理学和声学研究领域的热门课题之一.

近年来, Matula 等人^[8]比较了 MBSL 与 SBSL 在相近的实验条件下的光谱, 对 MBSL 与 SBSL 的发光机理作了大胆的假设. Hammer 和 Frommhold^[9]对不同温度条件下各种不同惰性气体的 SBSL 光谱和气泡半径

进行了比较. Yasui^[10]在前人的基础上进行了一系列有关惰性气体对于 SBSL 影响的研究, 将实验光谱与黑体辐射拟合的谱线进行对比, 还进行了气泡动力学的研究, 认为充入惰性气体可以明显地增强水中单泡声致发光的亮度, 而且分子量越大的惰性气体对 SBSL 的泡内温度的增强效果越明显.

对于多泡声致发光, 由于其产生的气泡极多, 而且这些气泡不能由实验者进行微观的控制, 不可能像控制单泡那样通过改变液体内的声场频率和声压来改变单个气泡的位置和发光强度; 在多泡声致发光实验中瞬间即会产生并湮灭大量的气泡. 因此, 对于多泡系统很难进行气泡动力学研究. 近年来对多泡声致发光主要集中在对其光谱的研究, 并与相似条件下的单泡声致发光实验进行比较. 近期研究表明^[11], 高声强下掺有惰性气体的水溶液中 MBSL 与 SBSL 光谱类似, 进而认为 MBSL 与 SBSL 的发光机制是相同的.

对于 MBSL 和 SBSL 的发光机理, 多年来各国研究人员一直在不断探索, 20 世纪 90 年代黑体辐射机制曾一度流行. 但近年来越来越多的研究表明, 黑体辐射机制并不确切. 相继出现的若干机制亦均不能圆满解释实验现象. 因此, 实验研究仍然是声致发光研究的重要方法.

本文通过实验研究氯化钠水溶液中多泡声致发光的光谱,通过改变氯化钠水溶液质量百分浓度(以下略作“氯化钠水溶液浓度”)和充入氦气的含量,将不同实验条件下得到的光谱进行对比,重点考察由于溶液浓度改变而导致的发光光谱,尤其是某些特定光谱的变化,并且找到使某些光谱强度产生明显变化所需要充入的氦气含量和氯化钠水溶液浓度的范围。

1 实验装置与控制软件

实验系统如图 1 所示。容积为 150 mL 的金属方形不锈钢盒子作为谐振腔,在该谐振腔中注入充有一定量氦气的氯化钠水溶液。氯化钠溶液在注入盒子前通过自制的除气与充气装置对其进行除气,并按实验需要充入一定量的氦气。Ultrasonic VCX750 型超声发生器用于产生超声,超声发生器工作在固定频率 20 kHz,其输出功率及工作时间都可连续调节。本实验中如果不作特别说明,则都取功放最大功率的 39%作为实际输出功率。Acton 公司的 SP-300i 光谱仪用于检测光谱,其 CCD 检测器以液氮冷却。气泡所发出的光透过一个石英窗,然后进入光谱仪。光谱仪进光狭缝的大小可以调节,本实验中取 0.2 mm。

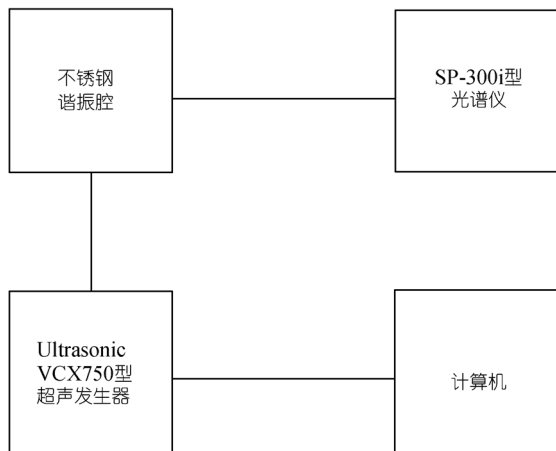


图 1 声致发光光谱测量实验系统

在实验中,通过 WINSPEC32 程序对光谱仪进行控制。可以控制光栅转动以改变所得到光谱的中心波长,还可以设定光谱的观察范围,从而可以根据需要对不同波长的细节进行观察与比较。此外,该软件还可以控制光谱拍摄的曝光时间,曝光时间在 0.1 s~

1 h 之间可调,还可选择单张拍摄和连续拍摄模式。由于我们最感兴趣的是连续谱背景上 310 nm 处的氢氧根离子光谱和 589 nm 处的钠原子光谱,因此可以通过 WINSPEC32 软件进行控制,以更好地观察该波长段的光谱细节。

2 结果

通过对不同浓度、不同氦气含量的氯化钠水溶液进行系统实验研究,我们得到以下结果。

2.1 不同浓度、不同氦气含量的氯化钠水溶液中的钠原子光谱

纯水中不充入氦气时的光谱是连续谱。若在水中溶入氯化钠,当浓度达到一定数值时,在一定强度的超声作用下,溶液中会产生大量的空化泡并发光。光谱分析表明,在 589 nm 处出现的谱峰是钠原子的光谱。图 2(a)是氯化钠水溶液中多泡声致发光的光谱,溶液浓度为 26.39%,没有充氦气。在 589 nm 处出现了钠原子的光谱,这说明只要溶液的浓度到达一定数值,即使不充入氦气也能出现钠原子光谱。图 2(b)是浓度为 17.36%的氯化钠水溶液中充入了不同含量的氦气的一组光谱,从上至下,氦气含量分别为 600, 180, 160 及 50 Torr (1 Torr = 133.3 Pa)。从图中可以较明显地看出,随着氦气含量的增加,钠原子谱峰的高度有了明显的提高。图 2(c)是浓度为 26.39%的氯化钠水溶液中充入不同含量氦气的一组谱线。从上至下,氦气含量分别为 600, 150 及 50 Torr。由图可见,充入 50 氦气和充入 150 Torr 氦气的结果是非常接近的,而充入了 600 Torr 氦气的钠原子谱峰则明显比 50 Torr 和 150 Torr 氦气的谱峰高出许多。综合图 2(b)与 (c),两种不同浓度的氯化钠水溶液中钠原子谱峰高度随氦气含量的变化是相似的,都在约 160~180 Torr 氦气时谱峰开始明显提升。这说明在一定范围内,氦气含量的增加对于钠原子谱峰的增强起着非常显著的作用。图 2(d)中氯化钠水溶液浓度为 26.39%,充入 600 Torr 氦气时的谱线。由图可见,在 588.9 nm 及 589.5 nm 处,出现了两个钠原子的谱峰。这与光谱学中钠原子的光谱结果是相吻合的。值得一提的是,当充入氦气含量为 300 Torr、氯化钠水溶液浓度仍为 26.39%时,是无法观测到分裂的钠原子双峰的。可见在高浓度的氯化钠水溶液当中,充入足量的氦气可以使钠原子谱线发生分裂。

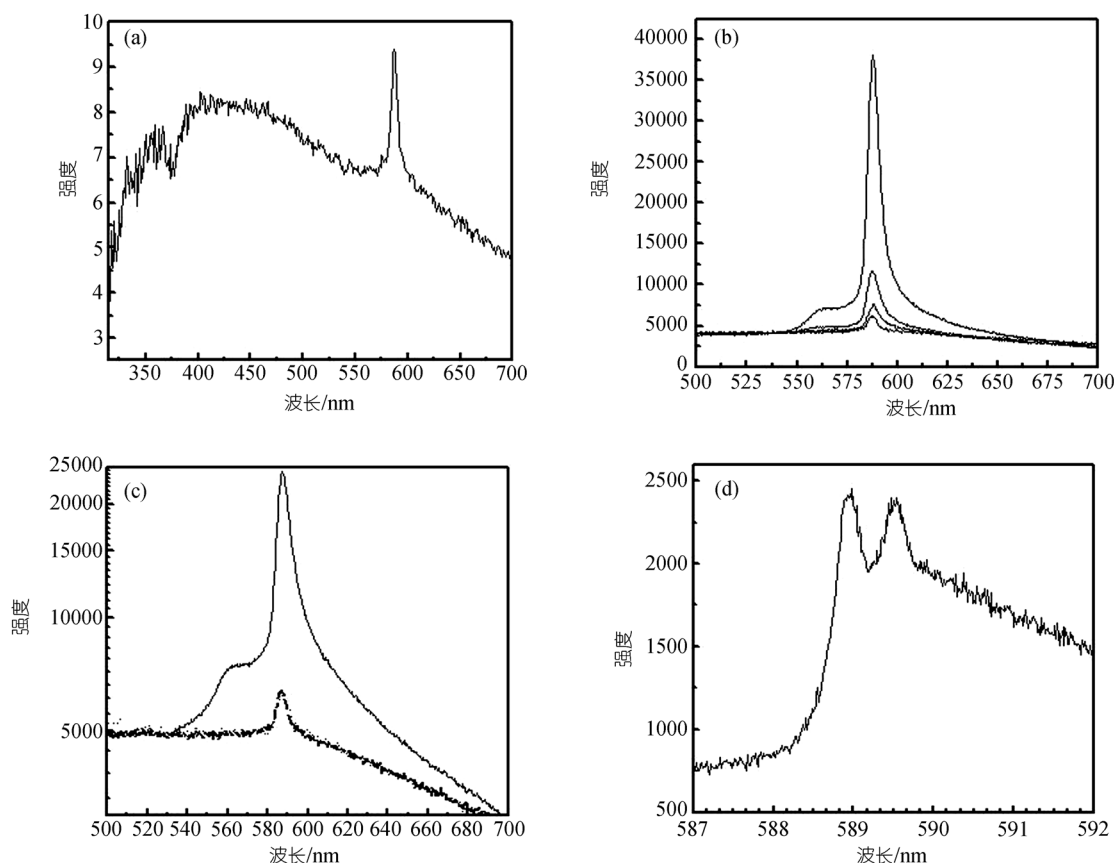


图2 不同浓度的氯化钠水溶液中充入不同含量氦气时的多泡声致发光光谱

(a) 溶液浓度为 26.39%，溶液中充入 76 Torr 空气，曝光时间 60 s；(b) 溶液浓度为 17.36%，图中自上而下氦气的含量分别为 600, 180, 160 及 50 Torr，曝光时间 60 s；(c) 溶液浓度为 26.39%，图中自上而下氦气的含量分别为 600, 150 及 50 Torr，曝光时间 30 s；(d) 溶液浓度为 26.39%，溶液中充入 600 Torr 氦气，曝光时间为 10 s

2.2 纯水中充入不同量氦气时氢氧根离子的光谱

图 3 从上到下分别为充入 600, 180 及 160 Torr 氦气时纯水中氢氧根离子的光谱。由图可见，充入 160 Torr 与 180 Torr 氦气的两组谱线有较明显的差异，充入 180 Torr 氦气的光谱在 310 nm 处出现了氢氧根离子的光谱，而充入 600 Torr 氦气的谱线中，不仅在 310 nm 处，同时在 330 nm 处也略有谱峰存在，只是相对于图 2(b)中钠原子光谱的变化显得不是很明显。可见只有当充入的氦气含量达到一定的数值后，氦气对氢氧根离子的光谱才会有较明显的增强作用，而且这种增强作用比图 2 中氦气对钠原子光谱的增强效果要弱得多。

2.3 相同氦气含量、不同浓度氯化钠水溶液中的氢氧根离子光谱和钠原子光谱

图 4(a)由上至下分别是浓度为 26.39%，17.36%，

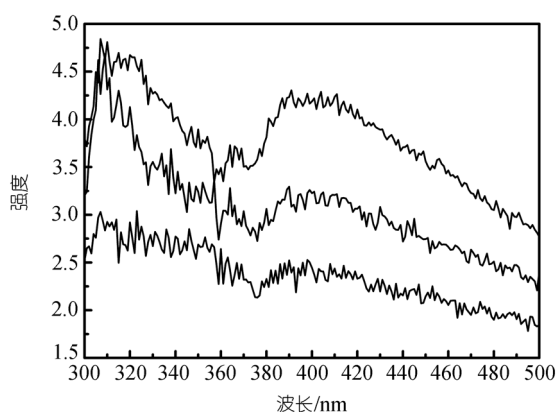


图3 纯水中充入不同含量氦气时的多泡声致发光光谱
曝光时间 60 s

12.28%及 6.54%的氯化钠水溶液中氢氧根离子的光谱。全部充有 300 Torr 氦气。由图可见，只有在氯化钠溶液浓度接近饱和时，氢氧根的光谱才开始出现，

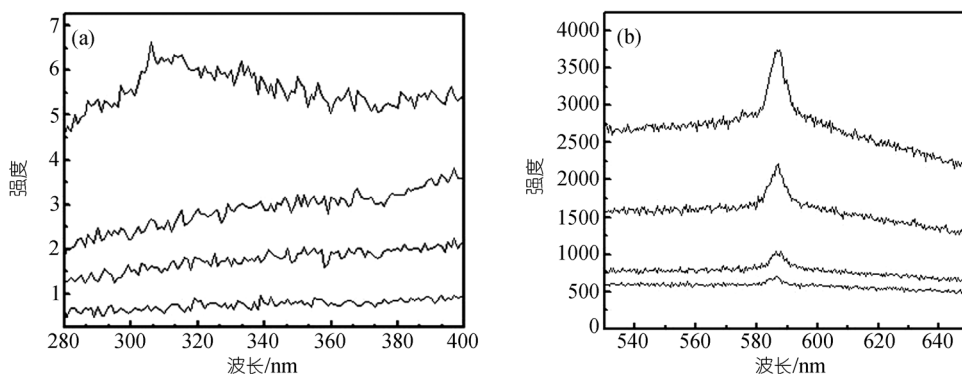


图4 不同浓度氯化钠水溶液中充入相同含量氩气时的多泡声致发光光谱

(a) 溶液浓度自上到下分别为 26.39%、17.36%、12.28%及 6.54%，均充入 300 Torr 氩气，曝光时间 60 s；(b) 溶液浓度自上到下分别为 26.39%、17.36%、12.28%及 6.54%，均充入 180 Torr 氩气，曝光时间 60 s

而下面的 3 个浓度中氢氧根离子的光谱均很不明显。与图 3 对比可以发现，溶液浓度的改变对于氢氧根离子光谱的影响不如氩气含量的改变对该光谱的影响明显。图 4(b)由上到下分别是浓度为 26.39%、17.36%、12.28%及 6.54%的氯化钠水溶液中钠原子的光谱，均充入 180 Torr 氩气。很明显，氯化钠溶液浓度的提高对于光谱的整体强度的提高有很明显的作用，6.54%浓度的氯化钠溶液的钠原子谱峰强度只有不到 1000，而浓度为 26.39%溶液的钠原子谱峰强度则超过了 35000。充入 180 Torr 氩气时，低浓度的氯化钠水溶液中发出的是较弱的蓝白色光，而高浓度的氯化钠水溶液中发出的是较强的橙色光。可见，相比于氢氧根离子光谱，钠原子光谱对于外界环境的变化更加敏感，其受溶液浓度影响而导致的谱峰高度的变化也更加易于观察。并且，与氩气的含量存在一个使光谱强度显著增加的范围类似，氯化钠水溶液的浓度也存在一定的范围，在这一范围内，氯化钠水溶液浓度的增加可以明显地使钠原子光谱的强度随之提高。在图 3 和图 4(a)中，氢氧根离子谱线均不够明显，有的甚至无法辨认，这可能是由较强的声压导致的谱线展宽造成的。

2.4 改变超声功率后充有氩气的氯化钠水溶液的 MBSL 光谱

图 5 是减小超声功率后氯化钠水溶液的 MBSL 光谱。由于超声功率下降，空化泡发出的光变得很暗，肉眼很难直接观察到。但在此光谱中，除了钠原子谱线外，氢氧根离子谱线比驱动声压较高时的谱线更加明显。并且相对于连续谱背景，钠原子的谱峰高度与

氢氧根离子的谱峰高度差变小。但与 Matula 等人^[8]实验得到的谱线相比，此处氢氧根离子谱峰仍相对较低，这可能是由于我们的超声功率与 Matula 等人的不同引起的。此外本实验中氯化钠溶液浓度较高，也是导致钠原子谱峰较高的一个重要原因。

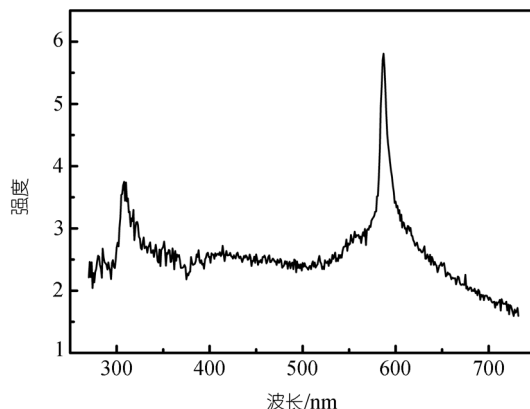


图5 浓度为 26.39%的氯化钠水溶液中，充入 300 Torr 氩气时的多泡声致发光光谱

功放的输出功率降到最大输出功率的 10%，曝光时间 120 s

3 结论

本文研究了氯化钠水溶液在不同浓度及不同氩气含量条件下的多泡声致发光光谱，发现在超声功率较高时，即使不充入惰性气体，也能较容易地在较高浓度的氯化钠水溶液中观察到钠原子的谱峰。只有在溶液中溶入适量氩气时，才能观察到氢氧根离子的谱峰，且钠原子光谱强度比氢氧根离子的光谱强度对实验条件的改变更加敏感。在一定浓度的氯化钠水溶液中充入氩气含量的增加在一定范围内对某些特定的谱峰增强起着显著的作用。而氯化钠溶

液浓度的提高也在一定范围内可显著地提高多泡声致发光的强度,这与单泡声致发光中硫酸浓度的变化对各种特定光谱的影响有类似之处^[2]。降低超声功率,以致气泡发出的光亮度变得肉眼很难直接观测时,氢氧根离子的谱线相对于本底却更加明显。由

于多泡声致发光比单泡声致发光易于控制,现象也更易于观察。同时,近年来的研究表明,即使不在高声强条件下,在溶有惰性气体的水及硫酸溶液中,单泡与多泡声致发光光谱相似^[12],因此多泡声致发光与单泡声致发光的研究可以相互启发与促进。

参考文献

- 1 Young F R. Sonoluminescence from water containing dissolved gases. *J Acoust Soc Am*, 1976, 60: 100—104
- 2 Gaitan D F, Crum L A, Church C C, et al. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91: 3166—3183^[DOI]
- 3 Flannigan D J, Suslick K S. Plasma formation and temperature measurement during single-bubble cavitation. *Nature*, 2005, 434: 52—55^[DOI]
- 4 Wang W J, Chen W Z, Lu M J, et al. Bubble oscillations driven by aspherical ultrasound in liquid. *J Acoust Soc Am*, 2003, 114: 1899—1904
- 5 王文杰, 陈伟中, 姜李安, 等. 自相似声压驱动下气泡的振动. *声学学报*, 2005, 30: 31—36
- 6 Tian Y R, Ketterling J A, Apfel R E. Direct observation of microbubble oscillations. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100: 3976—3978^[DOI]
- 7 Yasui K. Mechanism of single-bubble sonoluminescence. *Phys Rev E*, 1990, 60: 1754—1758^[DOI]
- 8 Matula T J, Roy R A, Mourad P D, et al. Comparison of multibubble and single-bubble sonoluminescence spectra. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 2602—2605^[DOI]
- 9 Hammer D, Frommhold L. Spectra of sonoluminescent rare-gas bubbles. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 1326—1329^[DOI]
- 10 Yasui K. Single-bubble sonoluminescence from noble gases. *Phys Rev E*, 2001, 63: 035301^[DOI]
- 11 Didenko Y T, Gordeychuk T V. Multibubble sonoluminescence spectra of water which resemble single-bubble sonoluminescence. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5640—5643^[DOI]
- 12 Xu J F, Chen W Z, Xu X H, et al. Composition and its evolution inside a sonoluminescing bubble by line spectra. *Phys Rev E*, 2007, 76: 026308^[DOI]