

空化乳化的高速摄影实验研究*

汪承灏 张德俊¹⁾ 宗 健

(中国科学院物理研究所)

提 要

我们用高速摄影方法,对单一空化气泡的乳化过程进行了实验研究。结果表明:(1)两种基本形式的乳化均发生在空化气泡完全闭合的瞬间,由此得出,乳化的发生是由于空化气泡完全闭合的瞬间在液体中产生的骇波作用的结果;(2)对于 A-B 两液相,如在 A 相中产生空化,则主要形成 A/B 型乳化。据此,与 Недужий 所推想的“抽吸”模型不同。我们把空化乳化过程的物理图象归之为“挤压”模型。

一、引 言

超声和声的乳化作用,四十多年前已被发现。由于这种乳化方法所产生的悬乳液有细和均匀等优点,已应用于生产实践。另外,关于超声清洗的机制之一,人们也归结为空化的乳化分散作用。但是迄今为止,对超声乳化作用本身的机制还不是很清楚的。一般认为,声的空化作用,在大多数场合起着关键作用,声引起的表面张力波在某些情况下也起一定的作用。而对于声空化的乳化作用的机制,则了解得很不够。

Недужий 对声空化的乳化作用作过一些较仔细但还是间接的实验^[1,2]。根据这些实验结果,对空化的乳化过程提出一种模型,把乳化的形成归之为空化气泡在收缩相所引起的负压“抽吸”的结果。但如果空化的乳化作用是与空化的基本作用之一——空化的机械效应有关联,那么这种模型似乎是与空化机械效应的骇波机制相抵触。

因此,有必要进行深入的工作,特别是作一些直接的实验研究。本文的目的,就在于用高速摄影对空化乳化的动力学过程进行实验研究,以弄清空化乳化作用的机制。

为了避免超声空化中众多空化气泡引起繁乱,便于准确确定空化乳化过程与空化气泡生长闭合运动的相位关系,我们采用动力学方法产生单一的大的空化乳化气泡,而用高速摄影方法对它的乳化作用进行直接观察与研究。

我们可以认为,乳化过程有这样两种基本形式(或阶段):一是两液相界面为平面时,两种液体的乳化分散;另一是两液相界面为球形界面,即一液相已被分散在另一液相中时,液滴被再经乳化分散,使此液滴进一步细化。我们对这两种基本形式的空化乳化过程进行了高速摄影实验研究。

* 1976年8月20日收到。

1) 现在中国科学院湖北物理研究所工作。

二、实 验 方 法

产生空化气泡的方法是采用 Chesterman-Schmid 的动力学方法^[3,4],它可以产生单一的大空化气泡。Chesterman 和 Schmid 曾用高速摄影观察了单一气泡的运动, Schmid 还拍摄了单一气泡闭合时的骇波照片。我们曾用此种方法,研究了空化气泡的电磁辐射和光辐射^[5],以及用高速摄影研究了空化气泡的运动^[6]。本文的实验沿用了以前的装置。其具体方法、工作原理和参数等均可参看文献[5,6]。

高速摄影设备采用了画幅频率为 300—3000 张/秒和 250—40000 张/秒的两种高速摄影机。拍摄方式有正象和剪影两种。有关高速摄影技术详情和拍摄条件也可参看文献[6]。

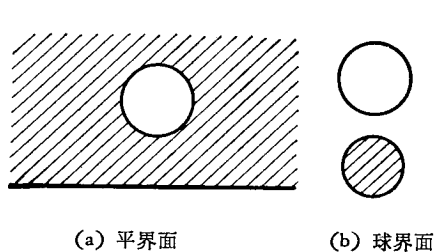


图 1 两种乳化形式

前面已提到,乳化作用有两种形式,如图 1 所示,即两相界面分别为平界面和球界面。对于液相界面为平界面的情况,实验很易实现,只要用两种互不溶解的液体分别注入实验容器即可。我们实验所用液体采用变压器油-水系统,也用过水-邻苯二甲酸二丁酯系统。实验前,均预先分别给予除气处理。空化气泡核在水中用电解法产生,在油中则采用注入法。

对于第二种形式——球界面情况,实验较难于实现。困难在于悬浮在液体中的乳滴,由于温度变化等因素的影响,很难稳定,往往很快浮至液面或沉入液底。为此,我们采用了下述方法,作为待乳化液滴是选用邻苯二甲酸二丁酯,它在 20℃ 时比重为 1.044,比水略大。而作为分散的周围液相是这样配制的:先注入一些一定浓度的食盐水溶液,使之比重比邻苯二甲酸二丁酯略大些,经过除气处理,之后再注入一些蒸馏水,并再进行除气。待一定时间后,两种液体互相扩散,造成一定的浓度梯度。此时再注入邻苯二甲酸二丁酯的液滴,它就能在适当高度上稳定悬浮。

三、实 验 结 果

1. 两液相为平界面的空化乳化分散过程

我们对上述油-水系统和水-酯系统分别进行了实验,得出相类似的如下实验结果和相同的结论。气泡在油相中空化所产生的油-水系统的乳化过程,其高速摄影照片如图 2。

由拍摄的照片可以看到乳化过程是这样进行的:在空化气泡的生长过程中,尽管由于气泡很接近界面,并且迅速长大,使得油-水界面受到泡壁的挤压而向水相中凸入,甚至凸入得相当显著,但对界面没有产生根本的影响,并不形成乳化过程。在跟着而来的收缩相,被泡壁挤压而凸入水相的这部分界面恢复变平,但并不跟着泡壁愈来愈快地收缩而向油相拢起。可是在紧接着的气泡完全闭合的瞬刻,在闭合气泡的正下方,油相被迅速地挤入水相;然后,部分油相断裂,形成一个油团被分散到水中,构成油/水型乳化。接着,在被挤入水中的油团边缘,可能由于油团的挤压作用或界面的扰动,看来有些小水珠被分散

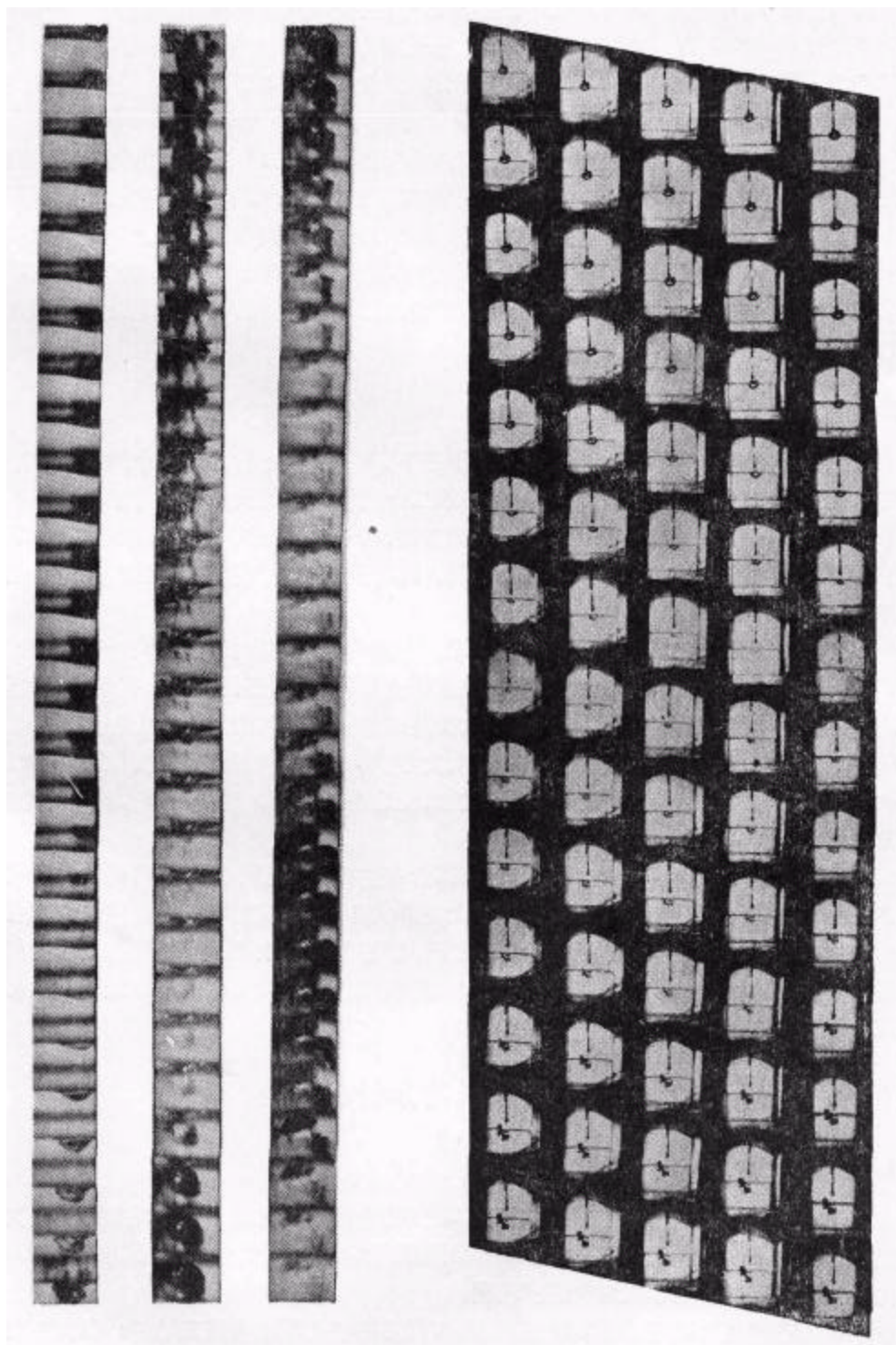


图2 两液相为平界面时, 气泡在油相中空化所产生的油-水系统乳化过程(照片次序从左第一列自上而下, 再第二列依次往下看……)拍摄速度: 3000张/秒

图3 在两液相的平界面上产生空化气泡的空化乳化过程(照片次序自左上第一行第一张起向右下, 再接左上第二行, 如此往下)拍摄速度: 5000张/秒

到油相中去了,形成水/油型乳化。但必须指出,主要形成还是油/水型乳化。在随后的气泡反跳过程中发生更加紊乱的扰动,造成油-水系统的互相分散过程。在此过程中,这些互相渗入形成的乳滴被进一步分裂和碎化,情况就更加复杂了,但也必须指出,这种进一步分裂和碎化的过程也主要发生在气泡每次反跳完全闭合的瞬间。

实验还在油相中产生过空化气泡。正如我们所预期的那样,在气泡完全闭合的瞬刻,发生水/油型乳化。我们也对水-邻苯二甲酸二丁酯系统进行了同样实验,得到同样结果。

此外,我们还发现一种有意思的情况(见图3):在两液相的界面上产生空化气泡,由于界面的存在,在长大的过程中,单一气泡被界面隔成两个气泡。之后它们分别闭合,而且在各自完全闭合的瞬刻,分别把所在相的液体,通过界面压入另一相液体中,形成各自的乳化过程。

2. 对液滴的空化乳化分散过程

已被分散的液滴(乳滴),在空化气泡作用下,进一步被分散为更细小的液滴,这是乳化的另一个基本形式,也可以看成是乳化的第二个过程。对此我们也进行了高速摄影研究。

使用前述控制食盐水溶液浓度梯度的方法,将一个直径约6—7毫米的邻苯二甲酸二丁酯液滴稳定地悬浮在水溶液的适当高度,而在液滴附近产生空化气泡,观察其乳化过程。

图4是液滴空化乳化过程的典型照片。在空化气泡的生长过程中,气泡向液滴很快接近。这时,随着气泡的长大和接近,使液滴变形(有时被压得很扁),但是此时液滴仍然没有被分散。随之而来的气泡闭合过程,使液滴恢复了原来的形状,但是没有拢起,更没有被分散。然而,在气泡完全闭合的瞬刻,突然液滴一部分被高速抛出,而产生液滴的进一步分散过程。再则,接着而来的反跳过程,在适当条件下,也可能产生乳化的进一步分散过程。

我们也发现在液滴内含有微小气泡,即含有空化核(见图5)。在我们的实验条件下,这些小气泡同样可以产生空化过程。因此在外力作用下,液滴中气泡很快涨大,使得液滴中液体向外挤出,而且被分割成几个小液滴,但好象还牵连着。而在气泡闭合过程中,仍保持这种状态。但是,当完全闭合时,较大的液滴被急速抛出不少小的液滴。也可以说,这个较大的液滴进一步分散细化了。

四、实验结果的分析 and 讨论

1. 空化乳化的机制——两种乳化的模型

Недужий 由一些超声空化的间接实验^[1,2]推论出的乳化模型可归结如下:(1)在空化气泡的收缩相形成乳化;(2)如在A-B两相系统中的A相发生空化,则应形成B/A型乳化。我们可以形象地称之为“抽吸”模型。

由上述直接的高速摄影实验结果,我们可以将空化乳化模型归结为:(1)在空化气泡完全闭合的瞬刻,开始形成乳化;(2)如果在A-B两相系统中的A相发生空化,则首先和主要的是形成A/B型乳化。相应地,我们可以形象地称之为“挤压”模型。这两种不同模型

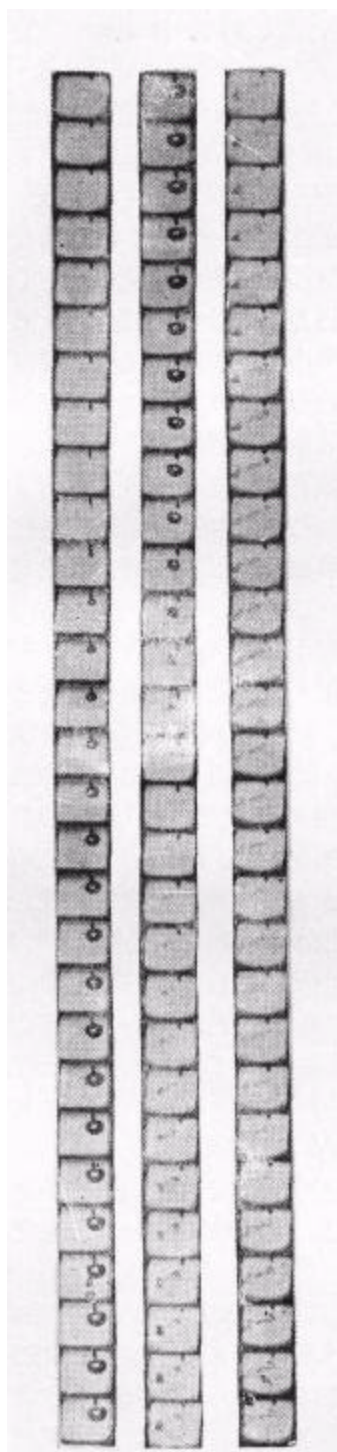


图4 液滴的空化乳化过程(照片次序同图2)
拍摄速度: 3000 张/秒

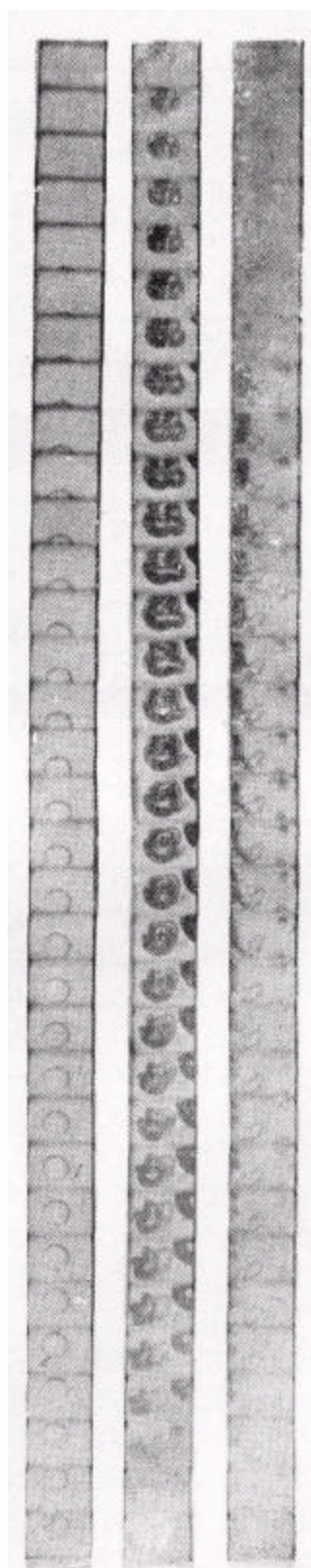
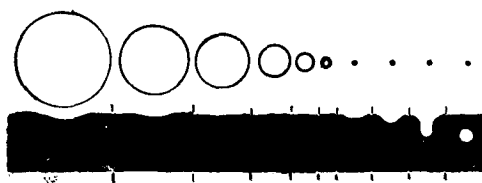


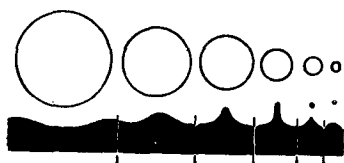
图5 液滴内含有空化核的空化乳化过程
(照片次序同图2)拍摄速度: 3000张/秒

的区别,很容易从图 6 中看出:图 6(a)为本文模型;图 6(b)为 Недужий 的模型(转引自文献[1]图6)。

高速摄影的直接实验结果表明,空化乳化过程主要是由于在气泡完全闭合时,产生的



(a) 本文模型



(b) Недужий 模型

图 6 空化乳化的两种模型

合时虽然也有一定大小的抽吸负压,但是由于跟随而来的更大的骇波压力(正压),集中放出外界所给予空化气泡的大部分能量^[6],在介质中造成强烈的陡削压力梯度,它会对界面造成很大的扰动和变形,超过一定限度,就会引起两液相界面的断裂分散,即形成乳化。而对液滴的进一步分散乳化过程的高速摄影,也得到相同的结果,即在空化气泡完全闭合的瞬间,由于骇波的作用,造成乳滴的进一步乳化细化。

对于 Недужий 的实验,有以下可疑之点:由于实验条件限制,乳化首先发生在容器壁附近区域,而因容器壁出现构成了三相界面,这本身就引起实验条件的复杂化。另

外,在乳化率随声强变化的实验中,一旦出现水/油型乳化后,很快水/油型乳化率就比油/水型乳化率高。乳化率随时间变化的曲线也如此。为了释疑,我们也采用了类似 Недужий 的实验系统,进行了超声空化乳化的初步定性观测。实验中,我们避免实验条件的复杂性,使容器充分大,并使容器壁附近声强较小。同时,也把声压调节到界面上,并调节超声发生器的输出尽可能地小,以便在低空化阈的液体中,刚刚能间断地产生空化,而在空化阈较高的液体中不能产生空化。我们采用过变压器油-水系统;水-邻苯二甲酸二丁酯系统;甲苯-水系统。在这三组中,第一组的水,第二组的水和第三组的甲苯空化阈较低,另外三种液体空化阈较高。

初步观察结果如下:比如在变压器油-水系统中,当控制声强使得在界面附近的水相中刚好能间断地产生空化时,可以观察到,一旦空化发生,这时主要是许多小水滴被分散到油中去了,当然也有较少的小油滴被分散到水中。这与我们单一气泡空化乳化的高速摄影结果是相一致的。

同时,在我们实验中还观测到以下两种现象:第一种是由于油的粘度较大,被分散的水滴不容易被分散到油相内部去,而停留在界面上,形成凝聚,这就容易形成反向过程,即水滴又回到水中去,构成解乳;第二种是如果液体的粘度很小,如甲苯中,水滴也很容易因重力下沉而解乳。看起来超声乳化现象本身是比较复杂的。因此,要更彻底了解声空化乳化机制,用较低频率,并设法产生单一空化气泡,利用高速摄影进行更深入细致的直接研究,看来是适宜的。

2. 乳化的能量

精确地给出乳化所需的能量是困难的, 因为我们还不能估计乳化过程中形成间断分散的能量, 只能估计在形成分散相之后势能的增加. 这部分能量可以说是有用能. 对于一个形成半径为 R 的液滴, 其势能增加可以认为就是液滴形成的表面能, 它可以写成

$$E_{\text{表}} = 4\pi\sigma R^2,$$

其中 σ 为两液相间的表面张力.

在我们实验条件下, 给予空化气泡的总能为

$$E_{\text{总}} = P_A \cdot V_{\text{max}},$$

其中 P_A 为大气压力, V_{max} 为空化气泡最大体积. $E_{\text{总}}$ 中一半左右的能量以骇波形式辐射出去^[6]. 如果假设空化骇波只形成一个乳滴, 则乳化的有用能与空化机械作用能量之比为

$$\frac{E_{\text{表}}}{E_{\text{总}}} = \frac{8\pi\sigma R^2}{P_A \cdot V_{\text{max}}} = \frac{6\sigma R^2}{P_A \cdot r_{\text{max}}^3}$$

在我们实验条件下, 设 $r_{\text{max}} \sim R \sim 1$ 厘米, $P_A \sim 1$ 大气压, $\sigma \sim 100$ 达因/厘米, 则 $E_{\text{表}}/E_{\text{总}} = 10^{-3} \sim 10^{-4}$. 这样看来有用能只占很小一部分的空化气泡所具有的能量.

现在再来估计一下液滴的乳化作用能量. 假设再行乳化分散后, 被分散成 n 个等体积的液滴, 则表面能增加为

$$\Delta E_{\text{表}} = (\sqrt[n]{n} - 1)E_{\text{表}}.$$

若 $n = 2$, $\Delta E_{\text{表}} = 0.26E_{\text{表}}$; 若 $n = 10$, $\Delta E_{\text{表}} = 1.15E_{\text{表}}$; 而 $n = 100$, $\Delta E_{\text{表}} = 3.6E_{\text{表}}$.

对于分散成 n 个不均匀液滴的情况:

$$\Delta E_{\text{表}} = 4\pi\sigma \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 - R^2 \right).$$

因此, 看来乳滴被进一步乳化的有用能也是空化骇波所载能量的很小一部分. 以上简略估计有助于说明: 空化骇波的能量足以形成两种基本形式的乳化过程; 同时对于单一气泡的一次乳化过程而言, 效率是较低的. 当然, 对声空化情况, 在多次重复声作用下, 骇波可对已分散的乳滴起进一步乳化分散作用.

参 考 文 献

- [1] C. A. Недужий, *Акуст. Ж.*, **10** (1964), 450.
- [2] S. A. Nédoujii, 5^e Congrès International D'acoustique, Rapports. **Ia** (Liege, 1965), D66.
- [3] W. D. Chesterman, *Proc. Phys. Soc.*, **B65** (1952), 846.
- [4] J. Schmid, *Acustica*, **9** (1959), 321.
- [5] 汪承灏、张德俊, *声学学报*, **1** (1964), 59.
- [6] 张德俊、汪承灏, *声学学报*, **3** (1966), 14.
- [7] 谢瑞珪、汪承灏, *声学学报*, **2** (1965), 187.
- [8] R. Hickling and M. Plesset, *Physics of Fluids*, **7** (1964), 7.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MECHANISM OF CAVITATION EMULSIFICATION EMPLOYING HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY

WANG CHENG-HAO ZHANG DE-JUN ZONG JIAN

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this work results are given for the experimental investigation of the mechanism of cavitation emulsification by means of high-speed photography. The results show that: 1) Two fundamental types of cavitation emulsification occur simultaneously at the moment of a single cavitation bubble collapse. It thus appears that: emulsification is induced by the shock waves generated in liquids at the moment of cavitation bubble collapse; 2) In contrast with the "suction" model suggested by Nedouzhii, the process of cavitation emulsification would be better described by a "crushing" model.