

气泡与自由液面相互作用的实验研究*

张阿漫 王超[†] 王诗平 程晓达

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

(2011 年 6 月 1 日收到; 2011 年 6 月 30 日收到修改稿)

气泡在不同边界附近运动时, 其运动特性与在自由场中相比会发生很大变化, 特别是当气泡在近自由面附近运动时, 与自由面发生强烈的耦合作用而产生极其复杂的水面现象. 为探究其规律, 在前人研究的基础上, 采用电火花生成气泡, 利用高速摄影系统对气泡与自由液面的相互作用进行了实验观察和研究. 通过对大量实验数据的分析和整理, 总结了自由液面的存在对气泡最大半径、脉动周期、射流时间以及射流宽度的影响, 并初步拟合了放电电压与气泡最大半径的关系. 对不同水冢现象的具体过程进行了分类和详细的描述, 得出了发生不同水冢现象的决定因素, 同时统计得到相同初始条件下水柱最大高度随无量纲距离的变化规律, 为气泡与自由液面相互作用的研究提供了参考.

关键词: 气泡, 自由面, 实验, 水冢

PACS: 47.55.dd, 47.55.dr, 47.54.De

1 引言

气泡脉动作为自然界中的一种普遍现象广泛存在于各个领域. 一方面, 其在现代科学领域被人们所利用, 比如在石油中灌注气泡便于将其运输至地面并且便于清洗; 但另一方面, 气泡在一些领域也具有危害性, 如铸造、焊接过程中微小气泡会影响工件的结构强度, 空化气泡会对螺旋桨造成损伤等. 关于气泡在各领域的应用及对气泡危害的预防一直是人们关注的焦点问题. 近年来, 随着水下爆炸在国防工业领域中的应用日益广泛, 对于气泡运动特性的研究也逐渐深入, 研究范围也从简单的自由场单气泡脉动延伸到复杂边界条件下的气泡脉动以及气泡群脉动等. 在实际的物理过程中, 气泡的形成、膨胀、坍塌、射流总是伴随着与周围介质和结构的相互作用, 因此其本身是一个极其复杂的过程, 只有充分揭示不同因素对其运动特性的影响, 掌握其运动的规律, 才能更好地完善气泡机理并将其合理地应用到国防、工业、制造等各个领

域中. 然而目前针对气泡脉动的研究尚缺乏较为完善的理论支持, 特别是当气泡在近边界附近运动时会出现特别复杂的物理现象^[1,2], 目前对这些复杂物理过程的相关研究^[3-6]较少. 自由液面作为气泡较为常见的边界条件在真实水下爆炸中普遍存在, 气泡在自由液面附近破裂会产生 Bjerknes 型凹射流^[2], 水上部分则形成明显的水冢现象^[7,8]. 因此, 研究气泡与自由液面的相互作用具有重要的理论意义和实际意义.

从第二次世界大战起, 气泡与边界的相互作用便得到了各国研究者的广泛关注. 在具体的研究过程中, 由于其现象及机理较为复杂, 单纯的理论方法和有限元方法无法给出合理的求解方案, 因此, 实验方法成为研究近自由面气泡脉动规律的主要手段. 早期的实验主要依赖于真实装药爆炸实验, 其生成的气泡复杂、安全性较差、不易操作、成本很高, 且由于药量和起爆位置等因素的限制, 实验很难具有普适性和可重复性, 也较难实施和观察. 近年来, 随着测

* 霍英东教育基金 (批准号: 121073)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50939002)、国家自然科学基金 (批准号: 10976008, 50809018, 51009035) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-10-0054) 资助的课题.

[†] E-mail: wangchao1987522@126.com

试技术和实验技术的快速发展,通过相似理论人们开始利用简易的气泡生成装置进行气泡实验以代替传统的真实的 2, 4, 6-三硝基甲苯 (TNT) 装药爆炸实验,并辅以高速摄影系统进行观察.例如, Gibson^[1] 通过电火花方式在低压环境中生成空化气泡来研究近自由面气泡的运动特性.近期, Robinson 等^[9] 以及 Tomita 和 Kodama^[10] 利用激光打火技术生成了单气泡和多气泡,研究了近自由面气泡的运动特性,从直观上获取了气泡与自由液面的相互作用规律.他们的方案实施简单,具有可重复性和易操作性,生成的气泡纯净且可以实现精确起爆,因此在气泡领域得到了广泛应用.

随着当今科学技术的发展,近自由面气泡的研究已经取得了较大进展,但由于气泡脉动本身的复杂性,仍存在很多问题尚未解决^[3].并且,之前与气泡脉动相关的多数实验研究往往只针对气泡脉动过程而忽视了自由液面的运动.因此,为了深入研究气泡与自由液面的耦合作用,本文从气泡与自由液面相互作用的实验方法入手,借鉴文献 [11, 12] 研究方法,设计了一套尺度可调、重复性好的整合可调式低电压气泡发生装置,在此基础上选取多个不同的工况进行电火花气泡实验,并借助高速摄影系统观察了气泡脉动及其引起的自由面运动和水冢现象,收集了大量实验图片和数据,从多方面出发对气泡与自由液面的耦合作用进行研究并总结了相关规律.研究结果表明:自由液面的存在对气泡最大半径、脉动周期以及射流时间和射流宽度有影响,实验电压及气泡最大半径存在一定的函数关系;气泡与自由液面相互作用的基本现象可以归

纳为 6 种典型的工况,且同一电压下水柱最大高度与无量纲距离存在明显的规律;无量纲距离是产生不同水冢现象的决定性因素,与初始状态无关.所得结论为近自由面气泡动态特性的研究提供了参考.

2 实验原理

本文在已有电火花技术^[3]的基础上加以改进,设计了一套整合可调式低电压气泡发生器及配套的专业气泡测量装置,用以模拟和观测气泡在水下的动力学过程.该装置包括整合的可调式低电压气泡发生器(实验电路见图 1)、Phantom V12.1 型高速运动分析系统以及连续光源、实验水槽和滑动导轨等配套装置

图 1 所示为实验电路.图 1 中 AC 为交流电源, DC 为交流转化后的直流电源,电压可调范围为 0.1—220 V; C 表示三个额定电压为 250 V、电容量为 2200 μF 的并联电容; R_0 表示阻值为 10 k Ω 的保护电阻; KM1 和 KM2 为分离充放电电路和控制电路的交流接触器; K1, K2 为充电、放电开关; L1, L2 为充电、放电指示灯, L3 为电源指示灯,实验中采用细铜丝作为电极接入电路.实验的基本过程如下:闭合充电开关,充电指示灯亮,开始为电容 C 充电,电压表指示电容两端的电压,当电压表的读数达到实验要求时,关闭充电开关,充电指示灯灭;闭合放电开关,放电指示灯亮,电路放电,同时开启摄像系统,此时铜丝在短时间内融化燃烧,并使得周围流体汽化,从而形成空化气泡.打火过程完成,依次关闭放电开关和摄像系统.

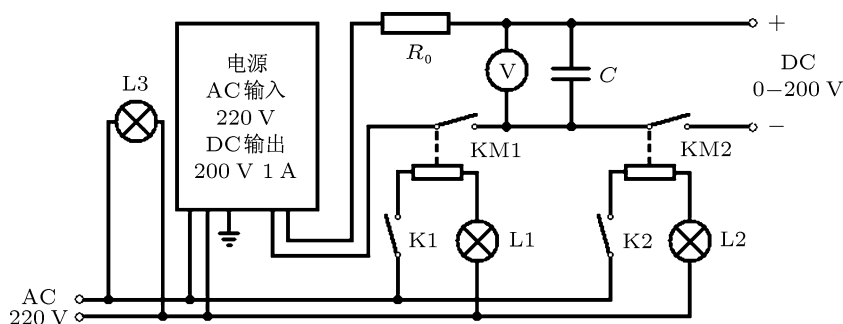


图 1 实验电路

3 实验结果及讨论

3.1 自由液面对气泡运动形态的影响

气泡在近自由面边界附近运动时, 由于边界的存在会使气泡呈非球状, 随后产生 Bjerknes 型凹射流, 脉动周期相对于自由场也有所改变. 因此, 本文从气泡最大半径、脉动周期、射流时间以及射流宽度等方面对近自由面气泡运动特性进行了实验研究.

实验中, 我们注意到当近自由面气泡脉动到最大半径时, 气泡远离边界部分近似保持为球状, 而靠近边界部分则产生变形 (靠近自由面附近时会因为自由面吸引而拉伸). 因此在计算气泡的等效体积时, 将气泡的整个体积分为上下两个部分来进行计算, 其中远离边界的气泡部分处理成球形, 靠近边界的气泡部分采用圆台体积积分的形式来近似. 气泡体积可以通过下式计算:

$$V = 0.5 \times \frac{4}{3} \pi R_{\text{down}}^3 + \sum_{i=1}^n (R_i^2 + r_i^2 + R_i r_i) \Delta h_i, \quad (1)$$

其中, R_{down} 为下半部分形状为球形的气泡半径, n 为上半部分分成的圆台数目, i 为圆台的层数, R_i 为第 i 层圆台下表面圆的半径, r_i 为第 i 层圆台上表面圆的半径, Δh_i 为圆台的高度. 气泡的最大等效半径可通过体积公式 $R = (3V/4\pi)^{1/3}$ 得到. 这里引入无量纲距离 $\gamma_f = d/R$, 即气泡初始中心 (爆点) 距自由液面的距离 d 与气泡最大半径 R 之比. 设定放电电压 $U = 200 \text{ V}$, 通过高速摄影系统获取了对应于不同 γ_f 时的气泡最大半径 R 以及气泡脉动周期 T , 并与 100 mm 水深处的情况进行了对比, 结果如图 2 所示 (100 mm 水深时气泡基本成球形).

从图 2(a) 可以看出, 在相同电压下, 爆点距离自由液面越近, 气泡的最大半径越大, 然而不同水深处气泡最大半径相对于 100 mm 水深处气泡最大半径的改变并不是很大, 基本都在 10% 以内, 即气泡的最大半径受自由面影响较小. 从图 2(b) 可以看出, 气泡脉动周期随着水深的增大而增大, 在距离较小时改变明显, 在较深距离处则变化缓慢, 这与近壁面^[13,14]的情况恰好相反. 当气泡在壁面附近时, 由于在膨胀过程中受到壁面的阻碍作用, 收缩时又依附在壁面上, 因此造成气泡周期变大. 当气

泡靠近自由面时, 顶部回流收缩较快, 因此脉动周期较短. 对于该现象文献 [2, 15, 16] 曾经对其进行了研究.

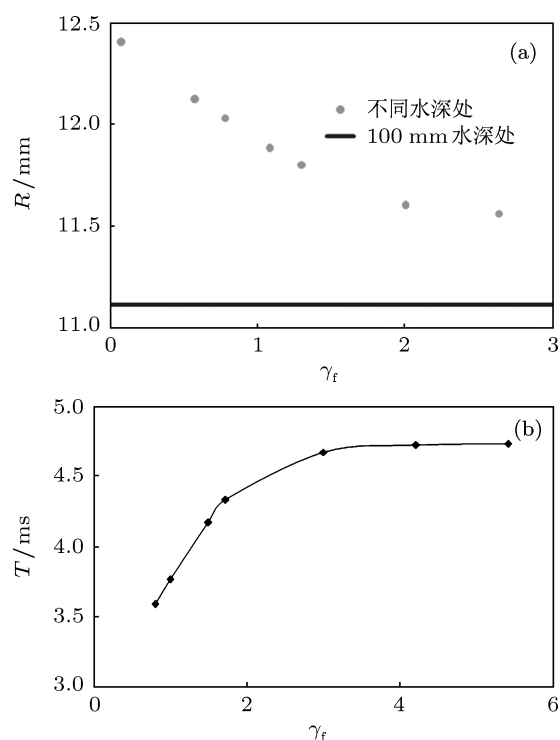


图 2 $U = 200 \text{ V}$ 时不同水深处气泡运动特性的变化 (a) 气泡最大半径的变化; (b) 气泡脉动周期的变化

由文献 [17, 18] 可知, 当气泡在壁面附近运动时, 会产生朝向壁面的射流, 而在自由面附近时则产生背向自由面的 Bjerknes 型凹射流, 即自由面的存在导致射流的产生并决定射流的方向. 在近自由面气泡坍塌的过程中, 顶部流体回流速度较底部快, 因此形成向下的射流, 同时由于顶部两侧水流在气泡上方汇合形成驻点高压区, 导致水流向上涌动, 在水面上方形成复杂的水冢现象. 在实际水下爆炸中, 近自由面气泡射流的时间、速度以及宽度受到很多因素的影响, 受限于现有的设备条件, 本文仅对相同电压下气泡射流的时间和宽度进行了研究, 整理选取了 $U = 200 \text{ V}$ 时典型 γ_f 工况下气泡射流的照片如图 3 所示. 图 3(a) 为 $\gamma_f = 0.7$ 时气泡射流示意图, 图中气泡处于坍塌阶段, 射流已经形成, 较细, 且已到达气泡的中心位置. 图 3(b) 为 $\gamma_f = 0.82$ 时气泡射流示意图, 图中气泡亦处于坍塌阶段, 射流已经形成, 射流较粗, 且已到达气泡的中心位置. 图 3(c) 为 $\gamma_f = 1.06$ 时气泡射流示意图, 图中气泡处于坍塌阶段, 射流已经形成, 且到达气泡的中心

位置, 比上两个工况的射流更宽. 对比图 3(a), (b), (c) 可以发现, 在同一电压下, γ_f 越小, 射流越早, 射流越粗.

通过对大量实验数据的总结发现, 不同放电电压下气泡的运动特性会有较大的改变. 因此, 我们选取不同电压进行了多组实验,

初步拟合了电压 U 与最大半径 R 的关系, 结果如图 4 所示. 由于每次实验有一定的随机性, 因此我们在同一电压下进行了多组实验并取其平均值, 基本满足关系 $R = 0.00000307U^3 - 0.00155659U^2 + 0.30205169U - 11.61483574$, 实验中发现 $U < 80$ V 时不产生气泡.

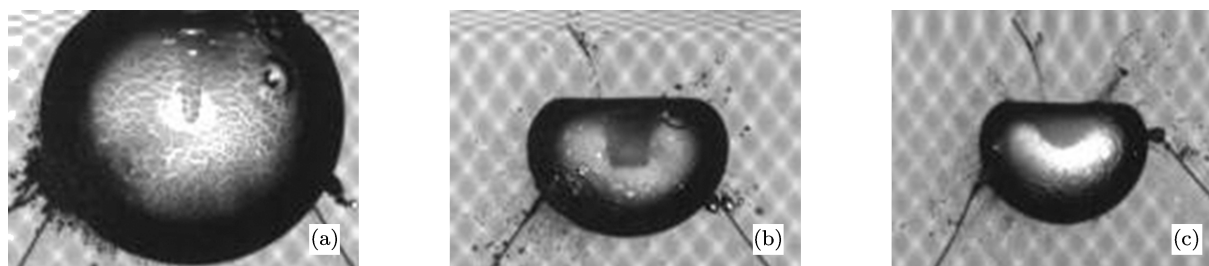


图 3 不同距离下的气泡射流 (a) $\gamma_f = 0.7$; (b) $\gamma_f = 0.82$; (c) $\gamma_f = 1.06$

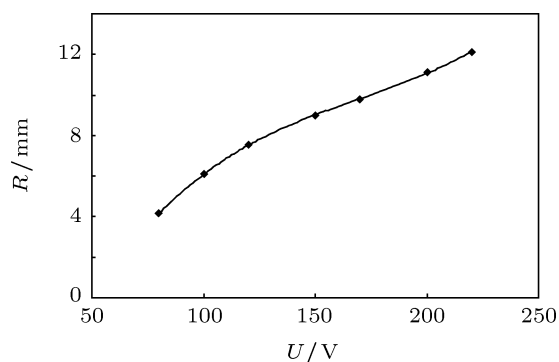


图 4 不同放电电压下气泡的最大半径 R 与放电电压 U 的关系

3.2 典型水冢现象

在气泡与自由面相互作用的过程中, 自由面的运动相对于气泡脉动和射流更加复杂, 运动形态也存在着多样性. 首先表现出的是当气泡中心的初始位置距离自由液面较近时, 自由面在气泡脉动过程中有较大的起伏, 而当气泡中心的初始位置距离自由面较远时, 自由面在气泡脉动阶段则不会出现较大的起伏, 甚至只有小幅度的运动, 且当 γ_f 在一定范围内无论是气泡射流还是水柱形状都存在相似性. 因此, 本文首先在 $U = 200$ V 时选取从小到大不同的 γ_f 进行了实验研究, 通过对大量的实验现象的观察和总结发现, 不同的 γ_f 下, 气泡的运动形态有很大的不同, 但都可归纳为六种典型的工况.

图 5 所示为破碎型水冢. 此工况为电极贴近水面放电的情况, 气泡距自由表面大约为 1 mm. 放电产生的气泡最大半径大约为 12.4 mm, 爆点距离自由液面的无量纲距离 $\gamma_f = 0.083$. 从图 5 可以看到, 此工况下不能形成稳定的气泡、水冢以及射流. 在气泡产生的初期时刻 (距离气泡脉动初始时刻的时间 $t = 0.176$ ms) 自由表面已经破碎, 自由面质点获得了极高的速度并向外飞溅, 而水下部分则呈现半球状膨胀, 此时气泡内部与外界空气相通, 内外气压相等. 随后自由面在已有速度基础上继续膨胀, 从两侧向中间聚拢, 并于 $t = 7.706$ ms 时刻在上部闭合, 气泡连同上部气体共同组成一个封闭的区域, 气泡内部的压强为外界的标准大气压. 自由面在重力的作用下开始下落, 在 $t = 34.058$ ms 时刻水柱在重力的作用下穿透气泡下表面, 然后气泡在浮力的作用下向上运动, 下部呈扁平状继而最终破碎. 在此过程中始终未形成气泡射流.

图 6 所示为溅射型水冢. 电极交点距离自由面很近, 气泡生成位置距离自由表面的距离约为 7.03 mm, 气泡的最大半径约为 12.12 mm, $\gamma_f = 0.58$, 该工况下亦无法形成较为稳定的射流及水柱. 脉动前期伴随着气泡膨胀过程, 自由面被气泡拱起, 气泡上方水层的厚度越来越薄, 但未发生破碎和飞溅. 随后气泡达到最大半径, 在 $t = 1.55$ ms 时刻气泡顶部形成两股方向相反的水流, 气泡内部产生背向自由面的不稳定的较细射

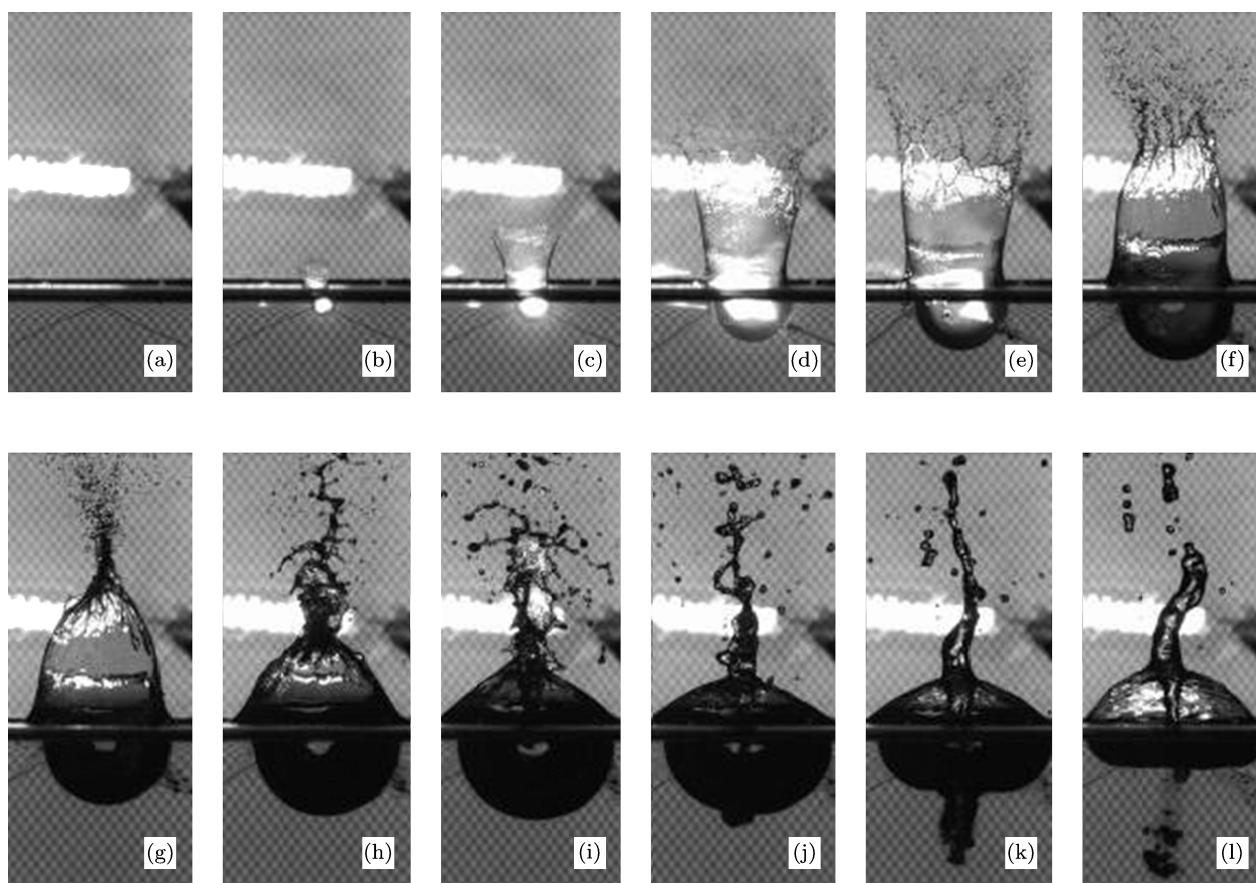


图5 $U = 200$ V, $\gamma_f = 0.083$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0$ ms; (b) $t = 0.176$ ms; (c) $t = 0.412$ ms; (d) $t = 2$ ms; (e) $t = 3.235$ ms; (f) $t = 5.588$ ms; (g) $t = 7.706$ ms; (h) $t = 13.823$ ms; (i) $t = 23.47$ ms; (j) $t = 34.058$ ms; (k) $t = 45.822$ ms; (l) $t = 65.645$ ms

流, 在上部自由面发生破碎, 形成较为复杂的溅射水流. 气泡内部射流速度大约为 9.481 m/s, 该射流在 $t = 3.1$ ms 时刻穿过气泡内部形成不稳定环状气泡, 而中心水柱则继续升高, 水柱两侧可明显观察到溅射状水冢, 水柱的最大高度约为 2170 mm, 中心水柱最大宽度约为 3.5 mm, 两侧水柱最大宽度约为 12.58 mm.

图7所示为皇冠型水冢. 爆点离自由面较近, 距离约为 9.5 mm, 气泡的最大半径约为 12.03 mm, $\gamma_f = 0.78$, 气泡射流速度大约为 27 m/s. 从图7可以看到, 在气泡膨胀的初期, 气泡保持球形, 在 $t = 0.882$ ms 时刻自由面被微微拱起, 气泡上部被吸入自由面, 此时气泡顶部较尖, 整个气泡已呈明显的非球状形态. 随后气泡继续膨胀, 在 $t = 2$ ms 时刻自由面继续被拱起, 顶端较尖. 在 $t = 2.882$ ms 时刻气泡开始坍塌, 顶部呈现扁平状并形成两股明显的水流, 在气泡内部可以清晰地

看到一股向下的很细的水射流, 射流宽度大约为 1.65 mm, 这股水射流以 27 m/s 左右的速度向下冲击气泡底部, 上部自由面形成明显的水柱并继续隆起. 在 $t = 4.588$ ms 时刻射流穿过气泡内部, 环状气泡形成. 在 $t = 6.412$ ms 时刻气泡被自由面击退, 第一次达到最小体积. 在随后相当长的过程中, 自由面继续隆起, 形成了中间高四周较低的皇冠型水冢, 其中中心水柱持续上升, 两侧水柱则向上向外延伸, 水柱的最大高度约为 537 mm, 中心水柱最大宽度约为 3.3 mm, 两侧水柱最大宽度约为 20 mm.

图8所示为冲天型水冢. 该工况下气泡的最大半径约为 11.88 mm, 气泡距离自由表面的距离约为 12.83 mm, $\gamma_f = 1.08$, 气泡射流速度大约为 15 m/s. 随着气泡离自由表面距离的增加, 自由液面以及气泡内部的运动形态也与前三种工况有很大区别. 气泡膨胀过程中自由面被顶起, 且在气泡膨胀的大部分时间内, 气泡基本呈球状.

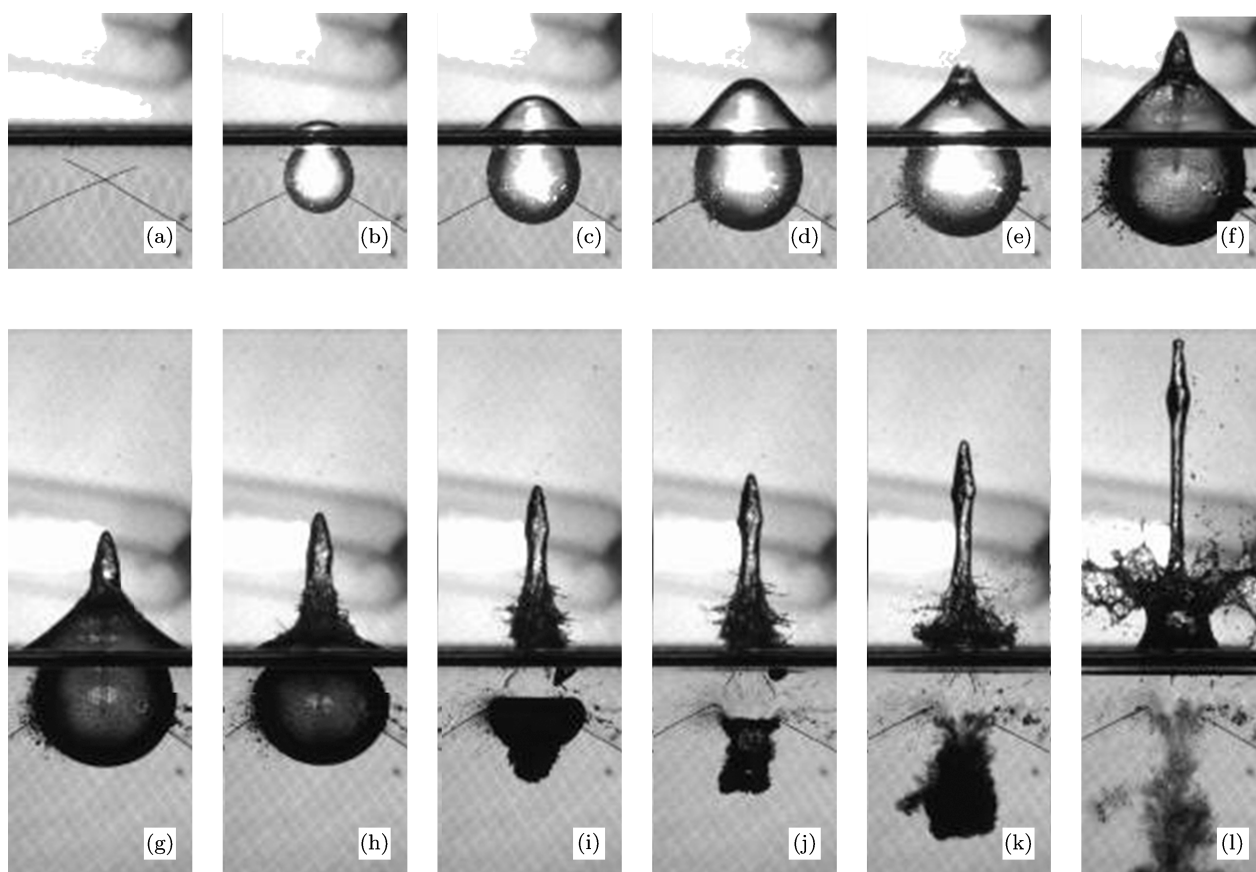


图6 $U = 200 \text{ V}$, $\gamma_f = 0.58$ 工况下的水豕现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 0.45 \text{ ms}$; (c) $t = 0.75 \text{ ms}$; (d) $t = 1.11 \text{ ms}$; (e) $t = 1.55 \text{ ms}$; (f) $t = 2.2 \text{ ms}$; (g) $t = 2.65 \text{ ms}$; (h) $t = 3 \text{ ms}$; (i) $t = 3.3 \text{ ms}$; (j) $t = 3.65 \text{ ms}$; (k) $t = 3.9 \text{ ms}$; (l) $t = 4.65 \text{ ms}$

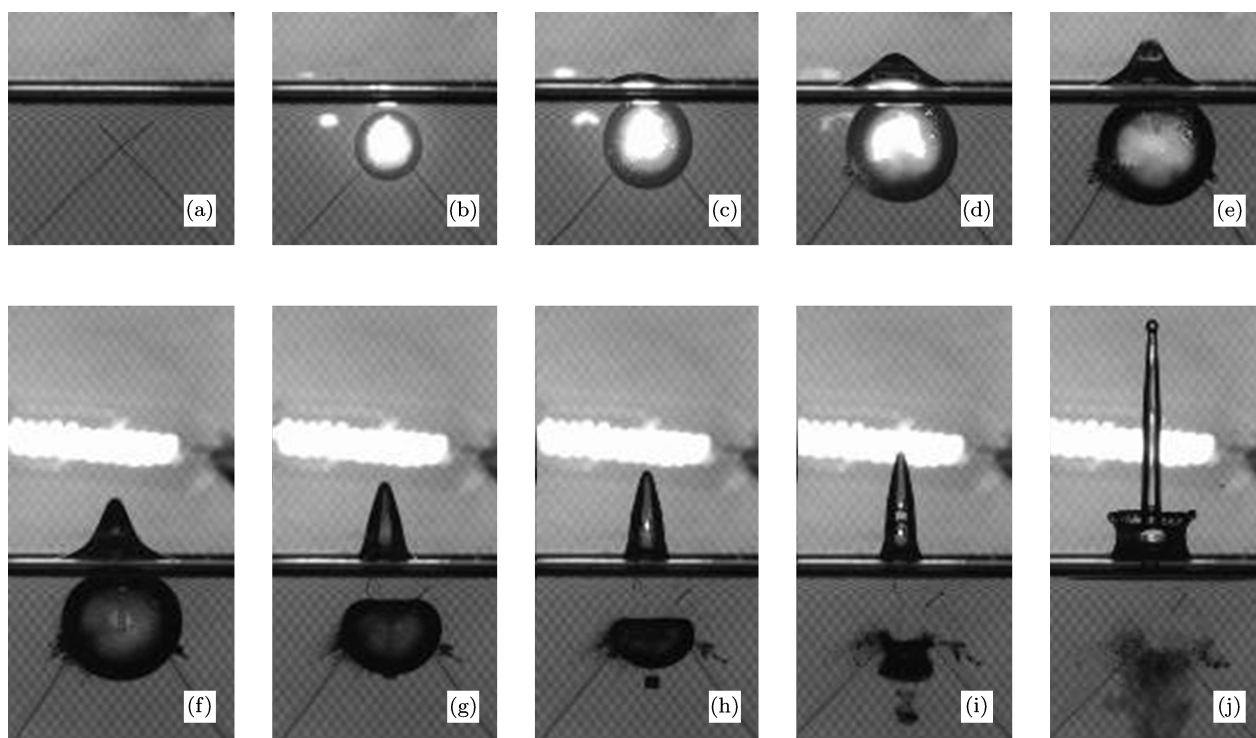


图7 $U = 200 \text{ V}$, $\gamma_f = 0.78$ 工况下的水豕现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 0.529 \text{ ms}$; (c) $t = 0.882 \text{ ms}$; (d) $t = 2 \text{ ms}$; (e) $t = 2.882 \text{ ms}$; (f) $t = 3.647 \text{ ms}$; (g) $t = 4.588 \text{ ms}$; (h) $t = 5.235 \text{ ms}$; (i) $t = 6.412 \text{ ms}$; (j) $t = 14.941 \text{ ms}$

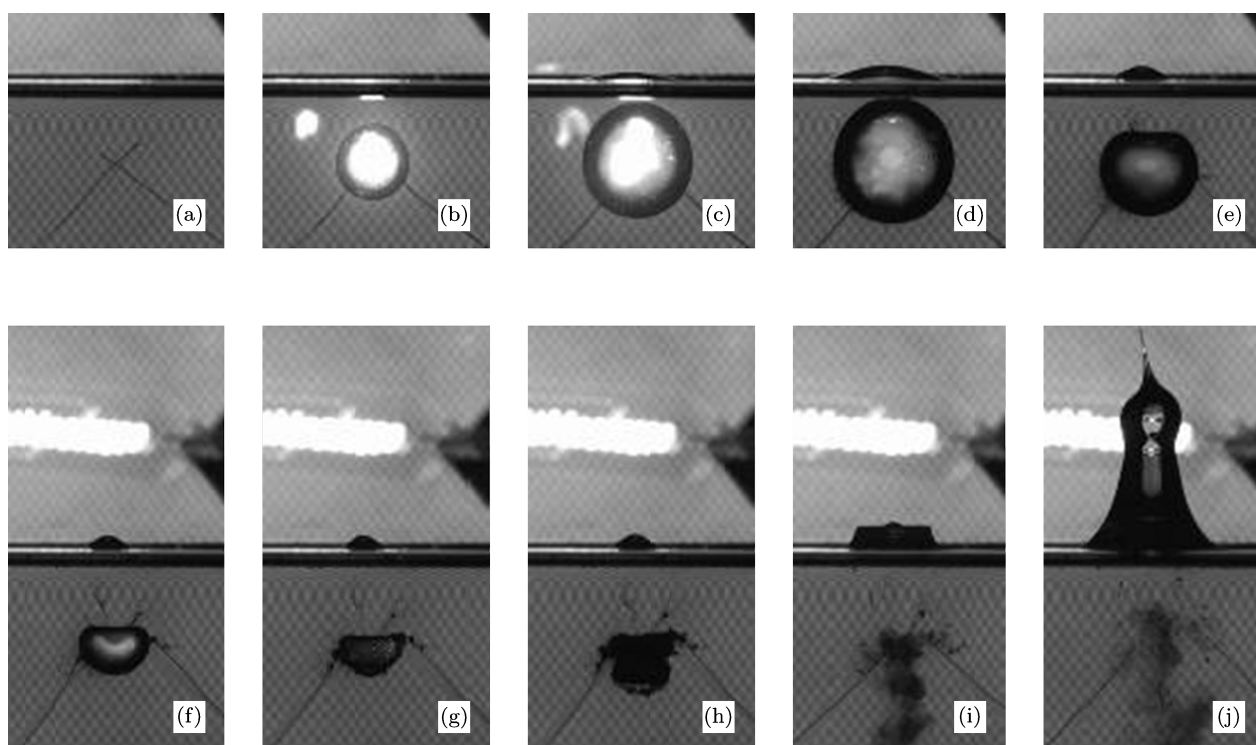


图8 $U = 200$ V, $\gamma_f = 1.08$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0$ ms; (b) $t = 0.588$ ms; (c) $t = 1.235$ ms; (d) $t = 1.765$ ms; (e) $t = 2.823$ ms; (f) $t = 3.235$ ms; (g) $t = 3.529$ ms; (h) $t = 3.882$ ms; (i) $t = 9.117$ ms; (j) $t = 44.822$ ms

在 $t = 1.765$ ms 时刻气泡达到最大半径, 此时顶部较尖, 略微呈现非球状, 自由面被隆起的面积较大. 随后气泡呈非球状坍塌, 顶部快速下落, 呈扁平状. 而后形成气泡射流, 射流宽度持续增加, 最大约为 5.13 mm, 并在 $t = 3.529$ ms 时刻射流穿过气泡内部, 形成环状气泡. 在气泡顶部快速回落的过程中, 自由面中心两侧开始下落, 中心形成明显的水柱, 并持续升高. 而在气泡坍塌消失后, 自由面中心两侧开始隆起, 在随后相当长的时间内自由面继续升高, 形成很粗的冲天型水柱, 水柱最大高度约为 40 mm, 最大宽度约为 25.6 mm.

图 9 所示为丘型水冢. 该工况下爆点离自由面较远, 距离约为 15.249 mm, 气泡的最大半径约为 11.73 mm, $\gamma_f = 1.3$. 在气泡膨胀的大部分时间内呈球状, 自由面基本保持水平. 在 $t = 3.85$ ms 时刻气泡达到最大体积, 自由面被拱起, 随后气泡呈现非球状坍塌, 顶部快速下落, 类似于冲天型水冢的情况, 此时自由面两侧开始下落, 中心水柱继续上升, 如图 9(e) 所示. 在气泡坍塌结束后, 水柱两侧开始隆起, 且于 $t = 20$ ms 时刻水柱两侧高度超过中心处的高度.

而后于 $t = 43.7$ ms 时刻中心被顶起, 顶部很尖, 底部较粗, 形成中间高两边低的丘状水冢, 水柱最大高度约为 13.7 mm, 水柱最大宽度约为 29 mm.

图 10 所示为微鼓型水冢. 此工况下气泡离自由表面的距离较远, 约为 30.4 mm, 气泡的最大半径约为 11.56 mm, $\gamma_f = 2.63$. 该工况下气泡运动已经基本类似于自由场中的情况, 在气泡膨胀坍塌的绝大多数时间内, 自由表面基本保持水平, 气泡保持球状膨胀和坍塌, 只在气泡坍塌结束阶段, 顶部略微扁平, 并在 $t = 3.765$ ms 时刻气泡达到最小体积. 随后受到自由面的影响, 气泡产生了朝向下部的射流. 气泡消失后, 在 $t = 53.939$ ms 时刻, 自由表面呈现微微凸起, 水柱最大高度约为 2 mm, 最大宽度约为 6 mm.

从以上 6 个典型工况可以看出, 不同 γ_f 时, 气泡脉动以及自由液面的运动形态有很大区别. 从复杂的飞溅, 到规则的皇冠状水冢以及稳定的射流, γ_f 对水冢现象有很大影响. 当 γ_f 较小时, 即气泡距离自由面的距离较近, 气泡受自由面的影响较大, 自由液面以上部分耸起的高度较大, 且射流时间较早, 射流周期变小, 射流宽度较小. 随着 γ_f 的增大,

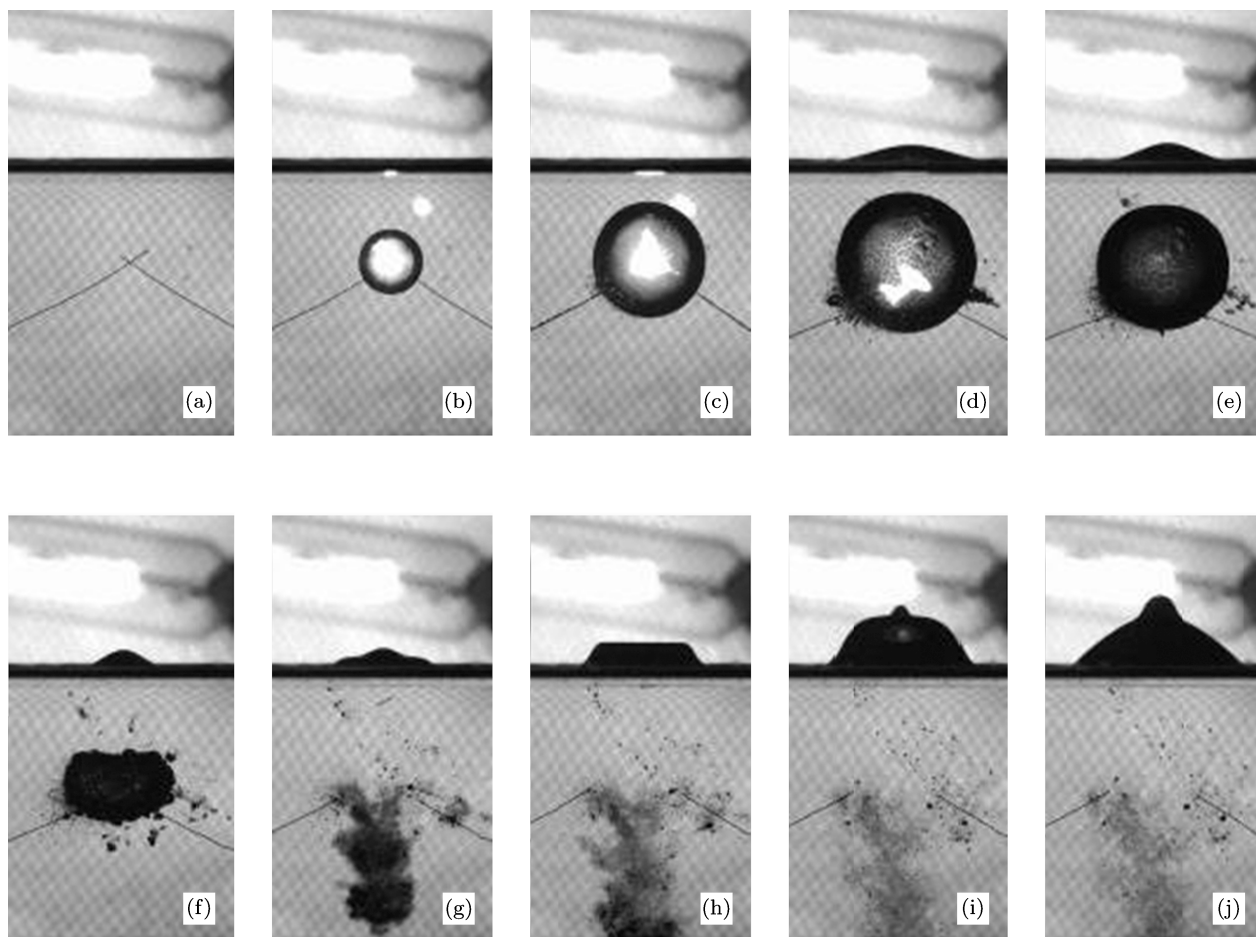


图9 $U = 200 \text{ V}$, $\gamma_f = 1.3$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 0.45 \text{ ms}$; (c) $t = 1.3 \text{ ms}$; (d) $t = 3.85 \text{ ms}$; (e) $t = 5.25 \text{ ms}$; (f) $t = 6.6 \text{ ms}$; (g) $t = 12.8 \text{ ms}$; (h) $t = 20 \text{ ms}$; (i) $t = 47.3 \text{ ms}$; (j) $t = 61.55 \text{ ms}$

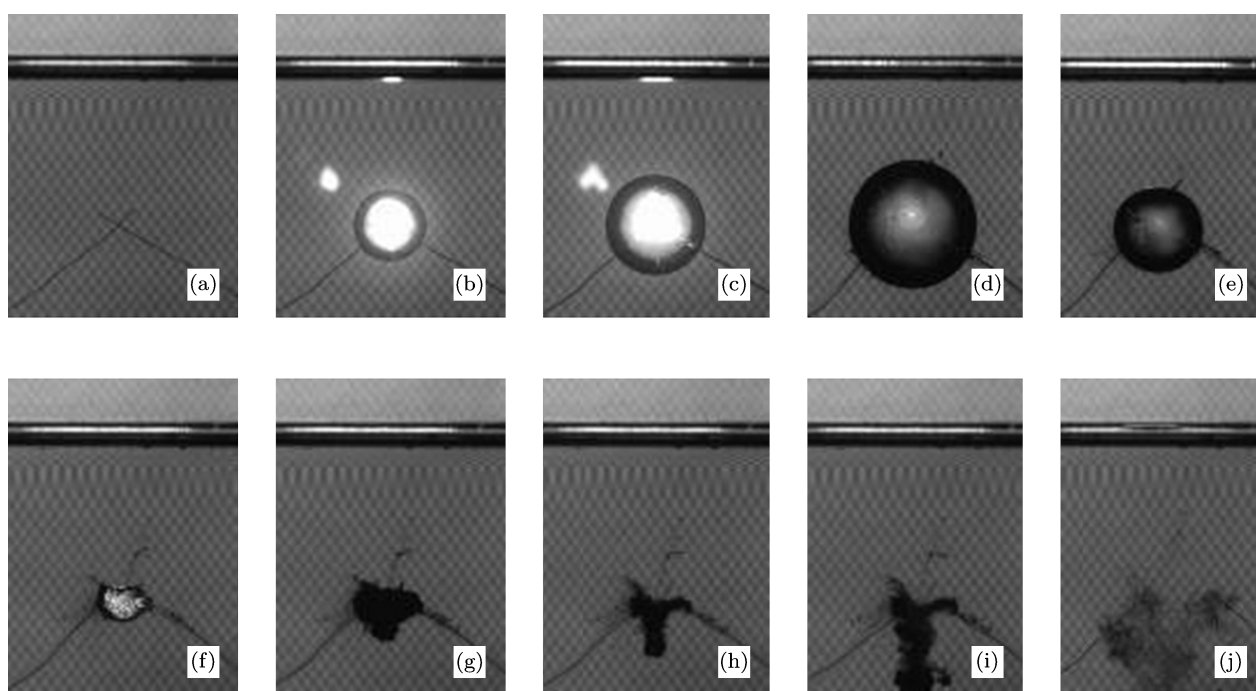


图10 $U = 200 \text{ V}$, $\gamma_f = 2.63$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 0.529 \text{ ms}$; (c) $t = 0.941 \text{ ms}$; (d) $t = 2.235 \text{ ms}$; (e) $t = 3.294 \text{ ms}$; (f) $t = 3.765 \text{ ms}$; (g) $t = 4.235 \text{ ms}$; (h) $t = 4.706 \text{ ms}$; (i) $t = 5.765 \text{ ms}$; (j) $t = 53.939 \text{ ms}$

气泡受到自由面影响变小,射流时间明显较晚,形成环状气泡时气泡已开始二次脉动,最后趋近于自由场中的情况.定义 D_f 为水柱顶点无量纲距离,

$$D_f = \frac{D}{R}, \text{ 其中 } D \text{ 为水柱顶点距离初始时刻自由液面的距离. 同时定义无量纲时间 } t_f = \frac{t}{R(\rho/\Delta P)^{1/2}},$$

其中 ρ 为流体的密度, ΔP 为气泡初始位置处的静水压力 P 与饱和蒸汽压 P_c 之差. 在不同的 γ_f ($U = 200 \text{ V}$) 时测得的水柱顶点随时间的变化曲线如图 11 所示.

从图 11 可以看出, γ_f 越小, 对应曲线原点处的斜率越大, 即气泡顶点的起始速度越大, 因此达到的最大高度也越大. 在水柱上升的过程中, 气泡的能量转换为水柱的势能以及自由液面以下气泡脉动的能量. 当 γ_f 较小时, 气泡水柱的高度随 γ_f 的变化速率较快, 即受到的影响较大.

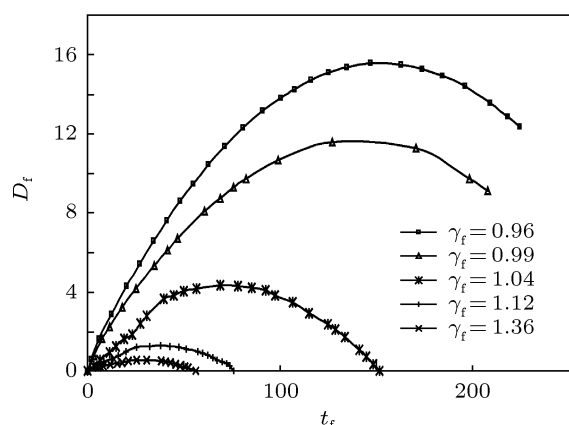


图 11 $U = 200 \text{ V}$ 时不同 γ_f 下水柱顶点距离 D_f 随时间 t_f 的变化

3.3 水冢现象的影响因素讨论

从上述 $U = 200 \text{ V}$ 时测得的实验数据可以看出, 在同一电压下水冢现象与 γ_f 有着直接的关系, 且不同打火电压对气泡的形态也有较大影响. 因此, 本文同时考虑这两个因素, 在上述实验的基础上选取 $U = 100, 120, 150, 170, 200, 220 \text{ V}$ 以及不同 γ_f 进行了多组实验, 以探求电压对水冢现象的影响.

通过大量实验数据的对比发现, 在相同 γ_f 的条件下水冢现象基本一致, 无论是水柱形态, 还是射流状态都基本相同, 并不受电压的影响. 电压较大的气泡达到最大体积的时间较晚, 脉动周期较长, 水柱的高度较高, 但高度之间并无明显的比例关系.

因此可以判断, 不同水冢现象的发生只取决于气泡生成位置距自由面的无量纲距离 γ_f , 而与初始状态无关. 由于受到篇幅的限制, 这里分别给出 $U = 100, 150$ 和 200 V , $\gamma_f = 1.1$ 的三个典型工况, 如图 12、图 13 和图 14 所示.

对不同电压、不同 γ_f 下的实验数据进行整理后可以明显发现, 不同 γ_f 以及不同电压下的水冢现象存在明显差异, 但水冢的基本形状都可以归于 $U = 200 \text{ V}$ 时的六种典型工况. 各种水冢现象发生的条件以及稳定情况如表 1 所列.

表 1 不同 γ_f 下的水冢形状

γ_f	水冢类型
0.0—0.4	破碎型水冢, 水柱形态不稳定
0.4—0.6	溅射型水冢, 水柱形态不稳定
0.6—1.0	皇冠型水冢, 水柱形态较为稳定
1.0—1.2	冲天型水冢, 水柱形态较为稳定
1.2—2.0	丘型水冢, 水柱形态较为稳定
> 2.0	微鼓型水冢, 水柱形态较为稳定

从表 1 可以看出, 当 $\gamma_f < 0.6$ 时, 形成的水冢不稳定, 存在明显的飞溅现象, 而当 $\gamma_f \geq 0.6$ 时, 形成的水冢则较为稳定, 只出现少量的水滴飞离现象. 水冢形状最终取决于 γ_f , 与初始状态无关. 当 γ_f 为 0—0.4 时, 爆点距离自由表面极近, 不能形成稳定的气泡、水冢和射流. 在气泡产生的初期自由表面已经破碎, 自由面质点获得了极高的速度并向外飞溅, 而水下部分则呈现半球状膨胀, 此时气泡内部与外界空气相通, 内外气压相等; 而后自由面在已有速度基础上继续膨胀, 从两侧向中心聚拢并在上部闭合, 气泡连同上部气体共同组成一个封闭的区域, 气泡内部的压强为外界的标准大气压; 随后自由面在重力的作用下开始下落, 同时水柱在重力的作用下穿透气泡下表面; 然后气泡在浮力的作用下向上运动, 下部呈扁平状继而气泡最终破碎. 在此过程中始终未形成气泡射流. 当 γ_f 为 0.4—0.6 时, 气泡距离自由面很近, 亦无法形成较为稳定的射流及水柱. 伴随着气泡膨胀过程, 自由面被拱起, 气泡上方水层的厚度越来越薄, 但未发生破碎和飞溅; 随后气泡达到最大半径并开始坍塌, 与此同时气泡顶部形成两股水流, 气泡内部产生背向自由面的不稳定的较细射流, 在上部自由面发生破碎形成较为复杂的溅射水流; 而后气泡顶部射流穿过内部

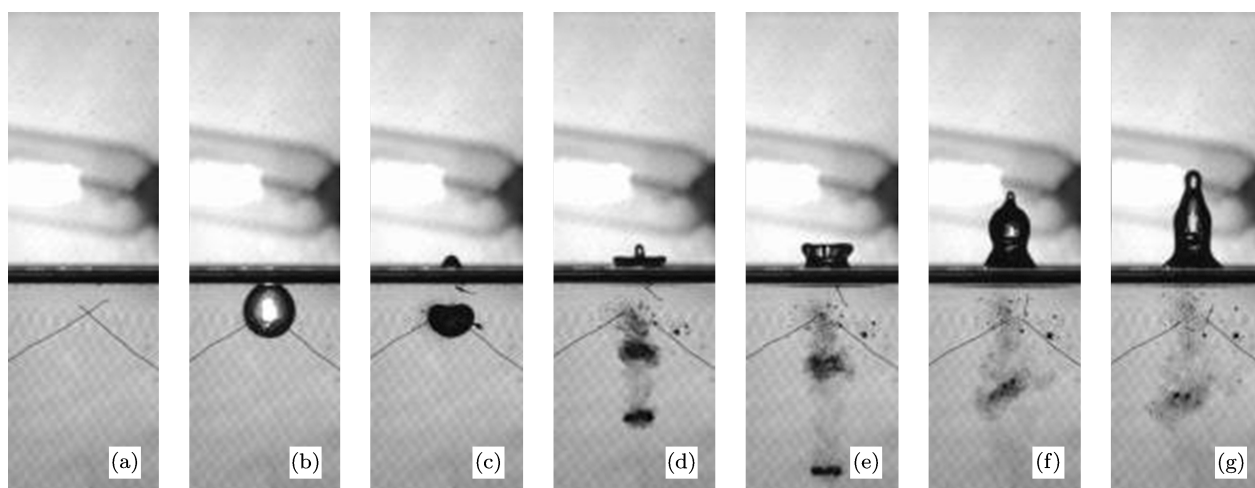


图 12 $U = 100 \text{ V}$, $\gamma_f = 1.1$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 1.25 \text{ ms}$; (c) $t = 3.9 \text{ ms}$; (d) $t = 9 \text{ ms}$; (e) $t = 13.05 \text{ ms}$; (f) $t = 30.3 \text{ ms}$; (g) $t = 39.3 \text{ ms}$

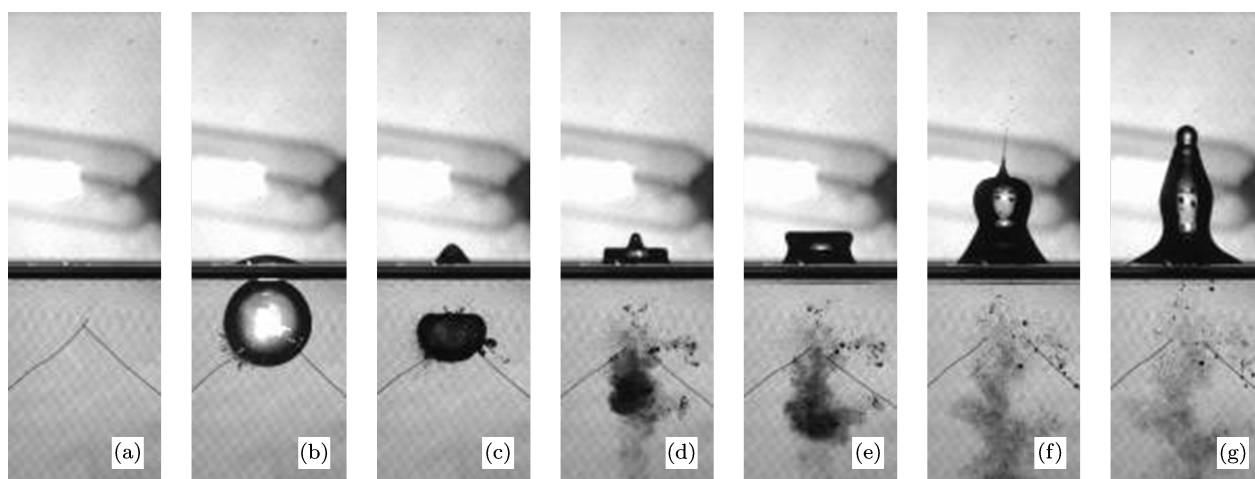


图 13 $U = 150 \text{ V}$, $\gamma_f = 1.1$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 1.7 \text{ ms}$; (c) $t = 4.15 \text{ ms}$; (d) $t = 10.1 \text{ ms}$; (e) $t = 14.95 \text{ ms}$; (f) $t = 39.1 \text{ ms}$; (g) $t = 72.35 \text{ ms}$

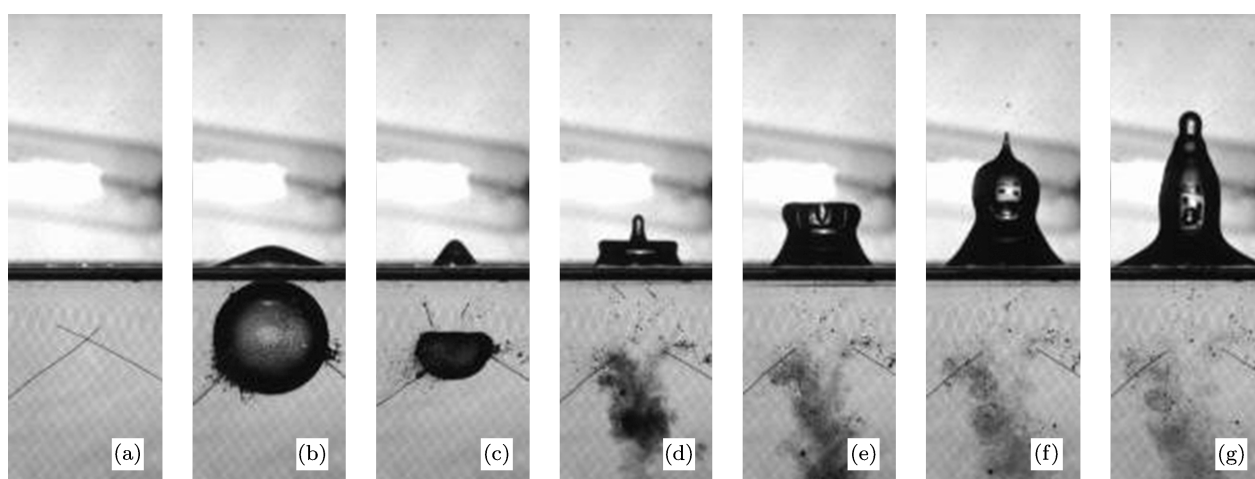


图 14 $U = 200 \text{ V}$, $\gamma_f = 1.1$ 工况下的水冢现象 (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 2.85 \text{ ms}$; (c) $t = 4.45 \text{ ms}$; (d) $t = 12.45 \text{ ms}$; (e) $t = 25.3 \text{ ms}$; (f) $t = 46.4 \text{ ms}$; (g) $t = 77.15 \text{ ms}$

形成不稳定环状气泡, 而中心水柱则继续升高, 可明显观察到水柱两侧的溅射状水冢. 当 γ_f 为 0.6—1.0 时, 气泡距离自由面稍远, 在气泡膨胀的初期, 气泡保持球形, 自由面被拱起, 气泡上部被吸入自由面, 此时气泡顶部较尖, 整个气泡已呈明显的非球状形态; 随着气泡的持续膨胀, 自由面继续被拱起, 顶端较尖; 而后气泡顶部快速回流, 呈现扁平状, 并形成两股明显的水流, 从气泡内部可以清晰地看到一股很细的水射流向下冲击气泡底部, 上部自由面形成明显的水柱并继续隆起; 气泡顶部射流穿过气泡内部后形成环状气泡, 而后气泡被自由面击退, 第一次达到最小体积; 在以后相当长的时间内自由面继续隆起, 形成了中间高四周较低的皇冠型水柱, 其中中心水柱持续上升, 两侧水柱则向上向外延伸, 且水柱顶点达到最大高度出现在气泡坍塌消失之后. 当 γ_f 为 1.0—1.2 时, 自由液面以及气泡内部的运动形态与前三工况有着较大的不同. 气泡距离自由表面较远, 气泡膨胀过程中自由面被顶起, 且面积较大; 随后气泡达到最大半径并开始坍塌, 自由面中心两侧开始下落, 气泡射流宽度继续增加; 最终射流穿过气泡内部, 形成环状气泡; 在气泡坍塌消失后, 自由面中心两侧开始隆起; 在随后相当长的时间内自由面继续升高, 中心再次被顶起, 形成明显的冲天型水柱. 当 γ_f 为 1.2—2.0 时, 气泡在膨胀的大部分时间内呈现球状, 自由面保持水平; 随后气泡达到最大体积, 自由面被拱起; 之后气泡呈现非球状坍塌, 顶部快速下落, 此时自由面两侧开始下落, 中心水柱继续上升; 在气泡坍塌结束后, 水柱两侧开始隆起, 且随后水柱两侧高度超过中心处的高度; 而后中心被顶起, 顶部很尖, 底部较粗, 形成中间高两边低的丘状水冢. 当 $\gamma_f \geq 2.0$ 时, 气泡距离自由表面已经很远. 在此工况中气泡膨胀坍塌的绝大部分时间内, 自由表面基本保持水平, 气泡保持球状脉动; 只是在气泡坍塌结束阶段, 顶部略微扁平; 气泡达到最小体积后, 由于受到自由面的影响, 气泡产生了向下的射流.

为研究不同电压下水柱最大高度与 γ_f 的关系, 我们分别选取 $U = 200, 170$ V, 并定义水柱的无量纲最大高度 $H_f = H/R$ (即 H_f 为水柱最大高度 H 与气泡最大半径 R 之比), 得出曲线如图 15 所示. 实验发现, 当 $U < 170$ V 时, 气泡产生半径较小, 受

到自由面以及其他因素的影响较大, 曲线较为曲折, 因此在图 15 中没有绘出.

图 15 表明, 爆点距离自由液面越近, 水柱最大高度越大. 然而不同放电电压下水柱最大高度之间不存在明显的比例关系, 但大体趋势基本一致. 当 $\gamma_f < 1$ 时, 曲线斜率较大, 变化陡峭, 水柱的最大高度随无量纲距离的减小而迅速下降; 当 $\gamma_f > 1$ 时, 曲线变化缓慢, 达到的最大高度较小. 从总体上看, 水柱高度随着 γ_f 的增大大致呈指数形式衰减, 并以 $\gamma_f = 1$ 为明显的分界点, 较好地验证了本文对水柱形状变化的讨论结果.

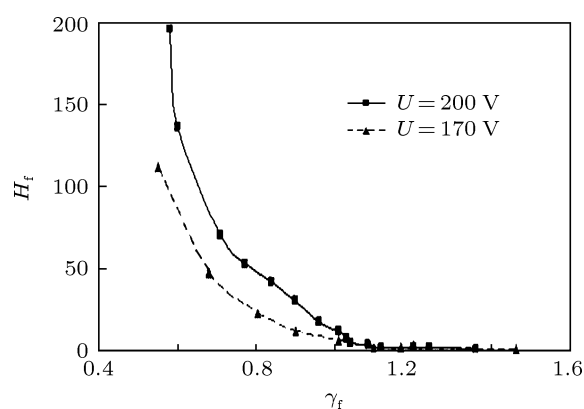


图 15 不同 γ_f 下水柱的无量纲最大高度 H_f

4 结论

本文利用高速摄影系统对气泡与自由液面的相互作用进行了实验研究. 研究表明: (1) 气泡受到自由液面的影响, 运动特性与重力场的情况有着较大改变. 在相同电压情况下, 气泡的最大半径随着 γ_f 的减小而增大, 但并不明显; 距离自由液面越近, 脉动周期越小, 且射流时间越早, 宽度越大. (2) 采用本文设计的电火花生成方式, 其放电电压与气泡最大半径之间存在明显的函数关系, 经初步拟合, 其函数关系为 $R = 0.00000307U^3 - 0.00155659U^2 + 0.30205169U - 11.61483574$, 此关系式为今后的电火花实验提供了一定的参考. (3) 气泡与自由液面存在强烈的耦合作用, 导致水上部分形成复杂的水冢现象, 考虑到水冢现象的相似性, 基本可归纳为破碎型水冢、溅射型水冢、皇冠型水冢、冲天型水冢、丘型水冢、微鼓型水冢等 6 种典型的情况, 且同一电压下水柱的最大高度

随着 γ_f 的减小而增大. (4) 不同水冢现象的发生只取决于爆点与自由液面的无量纲距离 γ_f , 而与气泡的初始状态无关. 当 γ_f 为 0—0.4 时, 形成破碎型水冢; 当 γ_f 为 0.4—0.6 时, 形成溅射状水冢; 当 γ_f 为 0.6—1.0 时, 形成皇冠型水冢; 当 γ_f 为 1.0—1.2 时, 形成冲天型水柱; 当 γ_f 为 1.2—2.0 时, 形成丘状水冢; 当 $\gamma_f > 2.0$ 时, 形成微鼓型水冢, 气泡膨胀和坍塌的形态已经接近于自由场的情况, 即基

本上呈球状. (5) 水柱无量纲最大高度随 γ_f 大致呈指数形式衰减. 当 $\gamma_f < 1$ 时, 曲线较陡, 变化迅速, 当 $\gamma_f > 1$ 时, 曲线变化缓慢, 达到的最大高度较小, 并以 $\gamma_f = 1$ 为明显的分界点, 较好地验证了本文对水柱形状变化的讨论结果.

感谢英国伯明翰大学的汪前喜博士为本文工作提出宝贵意见.

-
- [1] Gibson D C 1968 *Proceeding of 3rd Conference Hydraulic Fluid Mechanics* (Sydney: Pearson) p210
 - [2] Chahine G L 1977 *J. Fluid Eng.* **99** 709
 - [3] Abdolrahman D, Khoo B C, Mohammad T, Shervani T 2009 *Res. Art.* **46** 419
 - [4] Pozrikidis C 2004 *Eng. Anal. Bound Elem.* **28** 315
 - [5] Kalumuck K M, Chahine G L, Duraiswami R 1995 *J. Fluid Struct.* **9** 861
 - [6] Wang S P, Zhang A M, Liu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054720 (in Chinese) [王诗平, 张阿漫, 刘云龙 2011 物理学报 **60** 054720]
 - [7] Blake J R, Gibson D C 1981 *J. Mech.* **111** 123
 - [8] Cole R H 1965 *Underwater Explosion* (Beijing: National Defence Industry Press) p163 (in Chinese) [库尔 R H 1965 水下爆炸 (中译本) (北京: 国防工业出版社) 第 163 页]
 - [9] Robinson P B, Blake J R, Kodama T, Shima A, Tomita Y 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 8225
 - [10] Tomita Y, Kodama T 2001 *Proceedings of the IUTAM Symposium* (Birmingham: Springer) p303
 - [11] Zhang A M, Yao X L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 339 (in Chinese) [张阿漫, 姚熊亮 2008 物理学报 **57** 339]
 - [12] Zhang A M, Wang S P, Bai Z H, Huang C 2011 *Acta Mech. Sin.* **43** 71 (in Chinese) [张阿漫, 王诗平, 白兆宏, 黄超 2011 力学学报 **43** 71]
 - [13] Plesset M S, Chapman R B 1971 *J. Fluid Mech.* **47** 283
 - [14] Blake J R, Taib B B, Doherty G 1987 *J. Fluid Mech.* **181** 197
 - [15] Cerone P, Blake J R 1984 *J. Austral. Math.* **26** 31
 - [16] Wang Q X 1998 *Theor. Comp. Fluid Dyn.* **12** 51
 - [17] Klaseboer E, Khoo B C 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5808
 - [18] Lauterborn W, Bolle W 1975 *J. Fluid Mech.* **72** 391

Experimental study of interaction between bubble and free surface*

Zhang A-Man Wang Chao[†] Wang Shi-Ping Cheng Xiao-Da

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Received 1 June 2011; revised manuscript received 30 June 2011)

Abstract

As a bubble moves near different boundaries, the motion characteristic will change largely compared with the condition of free field, especially near the free surface: there will appear a complex phenomenon because of the interaction. This paper aims to investigate experimentally the phenomenon and the regularity of the interaction between bubble and free surface. Using a spark-generated device and a high-speed camera, the influences of free surface on the maximal radius, period, jet time and width of the bubble are discussed. The relation between the voltage and the maximal radius is obtained. Different typical phenomena near the free surface are observed. The factors inducing different plume phenomena are obtained. Then the regularity of maximal height of the water column varying with dimensionless distance under the same initial condition is obtained, which provides a reference to the research on the interaction between bubble and free surface.

Keywords: bubble, free surface, experiment, plume

PACS: 47.55.dd, 47.55.dr, 47.54.De

* Project supported by the Fok Ying-Tung Education Foundation, China (Grant No. 121073), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50939002), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10976008, 50809018, 51009035), and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-10-0054).

[†] E-mail: wangchao1987522@126.com