

不同沙粒底面下气泡脉动特性实验研究*

张阿漫 肖巍[†] 王诗平 程潇欧

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

(2012年3月19日收到; 2012年8月9日收到修改稿)

通过高速摄影系统对电火花气泡与不同沙粒底面间的相互作用进行了实验研究, 并改变气泡与沙粒底面之间的距离. 实验结果表明: 气泡在与沙粒底面的相互作用中会产生两种明显不同的现象, 即形成与近刚性壁面类似的气泡射流以及“蘑菇状”气泡, “蘑菇状”气泡撕裂形成两个气泡, 随后产生两个反方向的沿轴线方向的射流. 沙粒底面边界具有刚性与弹性两种特征. 另外, 随着气泡与沙粒底面之间的距离 d 的增大, 气泡脉动周期先增大然后减小, 存在气泡脉动周期峰值. 对于不同的沙粒底面边界, 出现气泡脉动周期峰值的距离 d 随着沙粒粒径的增大而越小.

关键词: 气泡, 沙粒直径, 电火花, 射流

PACS: 47.55.dd, 47.54.De, 47.85.Dh

DOI: 10.7498/aps.62.014703

1 引言

不同边界附近气泡的运动特性一直是人们研究的重点^[1-11], 气泡运动具有明显的脉动过程以及复杂的物理现象, 例如射流、环状气泡等, 且气泡在不同边界附近运动, 表现出全然不同, 甚至截然相反的运动现象. Blake 和 Gibson^[1] 利用近似积分法模拟了气泡在自由液面附近的膨胀、坍塌过程, 在膨胀阶段气泡逐渐变大且被自由面吸引, 自由面被顶起; 在坍塌阶段气泡在自由面的作用下形成向下的射流, 自由面形成水冢现象, 并与实验进行对比验证了数值结果的正确性. Klaseboer 等^[5] 通过数值和实验的方法研究了气泡在垂直刚性壁面附近的动态特性, 在膨胀阶段气泡被刚壁排斥, 气泡成扁平状; 在坍塌阶段, 在刚壁和重力的作用下形成指向刚壁的偏射流. Turangan 等^[8] 利用实验和数值方法研究了气泡与弹性膜的相互作用, 在气泡膨胀阶段, 气泡基本保持球形, 弹性膜在气泡的作用下向下弯曲; 在坍塌阶段, 弹性膜向气泡方向回弹并向上隆起, 气泡下部在弹性膜的挤压下开始收缩, 形成“蘑菇状”气泡, 随后分裂成两个气泡.

虽然气泡在不同边界附近的运动特性研究开展已久, 然而大部分的研究针对的是自由液面、刚性壁面等情况, 近年来气泡与弹性边界的相互作用也有相应的研究, 但气泡与沙粒底面的相互作用却一直鲜有研究. 因此研究气泡与沙粒底面的相互作用有着其丰富的现实意义. 本文分别选取粒径 Φ 为 0.1—0.25 mm, 0.25—0.5 mm, 0.5—1.0 mm, 1.0—2.0 mm, 2.0—5.0 mm, 7.0—10.0 mm 的沙粒底面, 改变气泡与沙粒底面的距离 d , 通过高速摄影系统对电火花气泡与不同沙粒底面的相互作用进行实验研究.

2 实验原理

电火花发生器从 20 世纪 80 年代起被广泛运用于气泡研究^[3,8,12,13], 由于其设备简单、操作容易、安全性好、费用低, 已成为研究气泡的重要实验手段之一. 具有代表性的有: Turangan 等^[8], Dadvand 等^[12] 采用低电压 55 V 打火, 把铜丝作为电极, 利用铜丝燃烧生成气泡. 另外高速摄像机的迅速普及使得人们能更好地记录电火花气泡的动态效应

* 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (批准号: 51222904)、国家安全重大基础研究项目 (批准号: 613157)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50939002) 和新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET100054) 资助的课题.

[†] 通讯作者, E-mail: xiaoweihubeu@gmail.com

尤其是气泡脉动过程以及复杂的耦合现象. 本文在 Turangan 等, Dadvand 等设计的低电压电火花气泡实验电路的基础上, 采用直流电压 200 V 经过 6600 μF 电容 (3 个额定电压 250 V, 额定电容 2200 μF 并联) 放电产生的电火花在水槽中打火生成气泡; 采用型号为 Phantom V12.1 的高速摄像机对气泡与沙粒底面的相互作用进行实验观察和研究. 气泡在 500 mm $\times$ 500 mm $\times$ 500 mm 的方形透明水槽中生成, 底部铺满不同粒径的沙子, 上部加入较为纯净的水, 在每次实验结束后将沙粒底面压平、压实以进行下次实验. 实验装置如图 1 所示.

3 实验结果与讨论

利用上述电火花气泡发生装置在水槽中进行一系列自由场气泡实验 (共 10 组), 测得气泡最大半

径如表 1 所示.

由表 1 中自由场气泡最大半径数据可知, 运用上述电火花气泡发生装置产生的气泡最大半径变化不大, 在 12.10 mm $\pm$ 0.20 mm 范围内, 因此可以认为本文的实验是在气泡最大半径相同的情况下进行的.

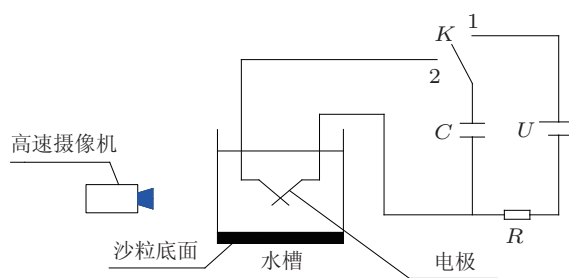


图 1 实验装置示意图

表 1 自由场气泡最大半径 R_m

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_m/mm	11.89	11.90	12.21	12.07	12.26	12.06	12.22	12.26	12.06	12.15

3.1 不同沙粒底面下气泡运动形态的讨论

3.1.1 $d \approx 0$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用

当 $d \approx 0$ mm 时, 不同粒径的沙子与气泡的相互作用现象大体相同, 沙粒底面沙子在气泡膨胀阶段向四周排开, 达到最大体积时呈半球状, 此时由于气泡的膨胀, 底部沙粒下凹; 随后在气泡坍塌阶段气泡下部两侧快速收缩, 沙粒底面沙子被气泡坍塌的滞后流激起, 向上运动, 气泡从下而上开始坍塌, 在气泡表面产生从下到上的环形扰动, 这种扰动传递到气泡将近顶部时, 在气泡上部形成环状射流, 这股射流将气泡从顶部分裂成两个气泡, 分裂后上部气泡较小, 下部气泡较大, 产生方向相反的射流, 上部气泡向上运动, 下部气泡直接被吸入沙粒底面. 该现象与 Turangan 等^[8]研究气泡与弹性膜的相互作用观察到的现象基本一致, 说明了沙粒底面边界的弹性效应. 此时形成的环状射流均较为稳定, 由于篇幅限制仅给出了 $d \approx 0$ mm 时气泡与 0.1—0.25 mm 和 7.0—10.0 mm 两种沙粒底面相互作用, 如图 2 所示.

3.1.2 $d \approx 4.85$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用

当 $d \approx 4.85$ mm 时, 不同粒径的沙子与气泡的相互作用现象大体相同, 沙粒底面沙子在气泡膨胀阶段向四周排开, 在气泡坍塌阶段气泡下部周围沙粒底面沙子被气泡坍塌的滞后流激起发生回弹现象, 流体从底部向上运动, 气泡从下而上开始坍塌, 在气泡表面产生从下到上的环形扰动, 这种扰动传递到气泡将近顶部时, 在气泡上部形成环状射流, 这股射流将气泡从顶部分裂成两个气泡, 分裂后上部气泡较小, 下部气泡较大, 产生方向相反的射流, 上部气泡向上运动, 下部气泡直接被吸入沙粒底面. 此时形成的环状射流也较为稳定, 由于篇幅限制, 图 3 仅给出了 $d \approx 4.85$ mm 时气泡与粒径为 0.1—0.25 mm 和 0.25—0.5 mm 的沙子的相互作用.

3.1.3 $d \approx 9.70$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用

当 $d \approx 9.70$ mm 时, 粒径为 0.1—0.25 mm, 0.25—0.5 mm, 0.5—1.0 mm 的沙子与气泡的相互作用的现象大体相同, 在该工况下可以明显观察到气泡在达到最大半径后, 由于沙粒底面的存在产生扰动, 侧面变长, 中间变细, 形成近圆柱形气泡, 而

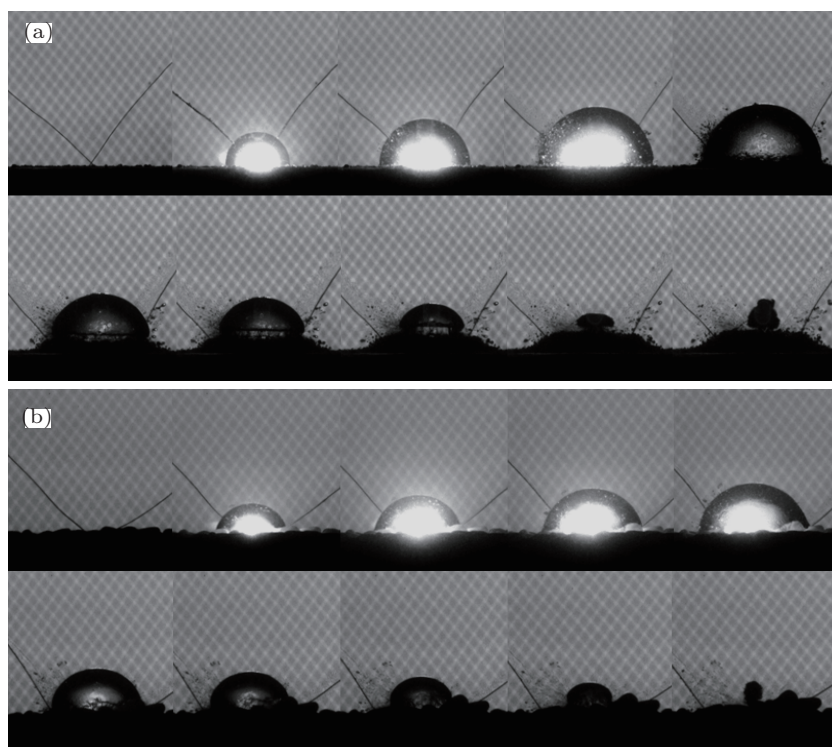


图2 $d \approx 0$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用 (a) 气泡与粒径为 0.1—0.25 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 0.50, 1.05, 2.25, 3.30, 3.90, 4.15, 4.45, 4.80, 5.15$ ms; (b) 气泡与粒径为 7.0—10.0 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 0.60, 1.20, 2.70, 3.65, 4.22, 4.43, 4.78, 5.20, 5.50$ ms

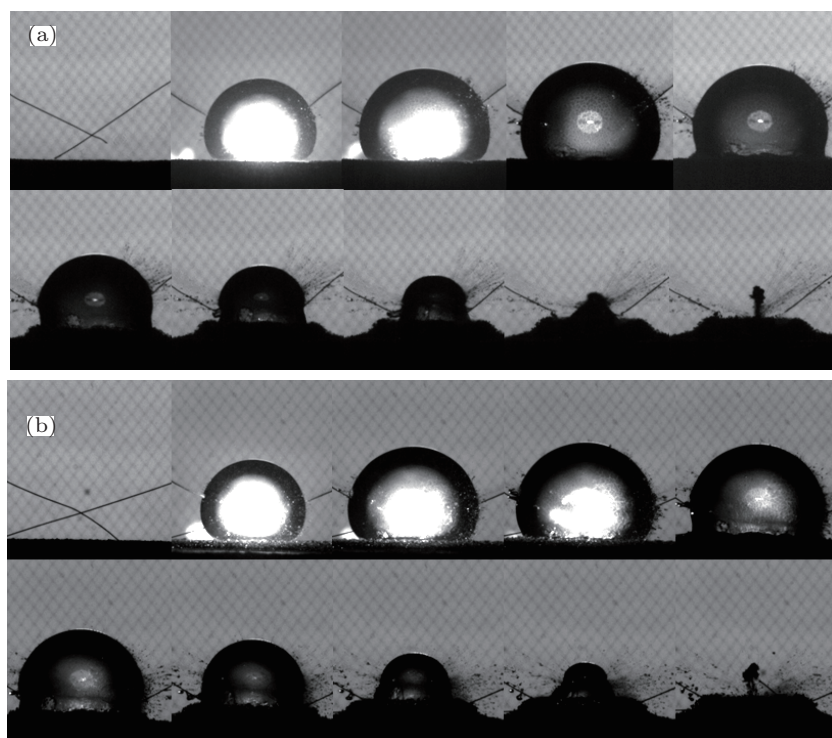


图3 $d \approx 4.85$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用 (a) 气泡与粒径为 0.1—0.25 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 1.10, 1.60, 2.30, 2.80, 3.25, 3.55, 3.70, 3.85, 4.00$ ms; (b) 气泡与粒径为 0.25—0.5 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 1.00, 1.70, 2.30, 3.00, 3.40, 3.90, 4.30, 4.50, 5.00$ ms

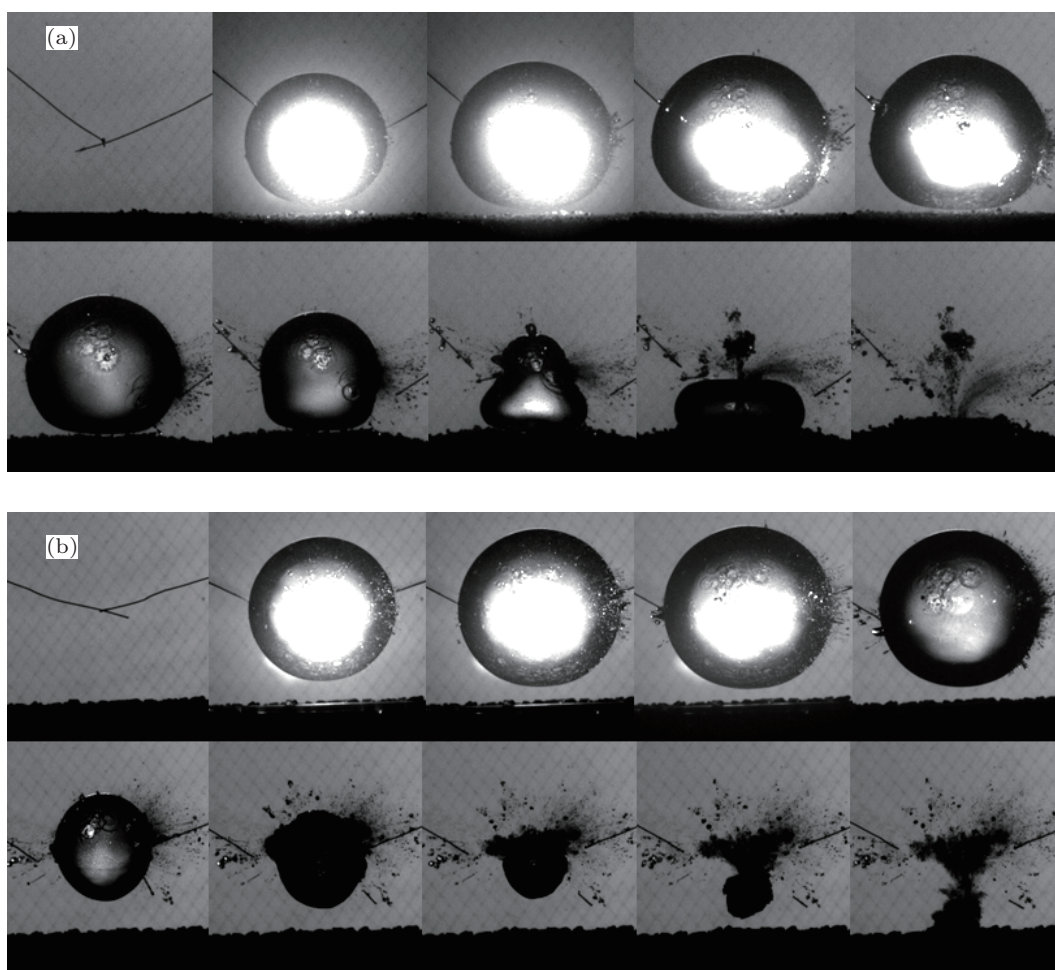


图4 $d \approx 9.70$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用 (a) 气泡与粒径为 0.5—1.0 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 1.30, 1.80, 2.50, 2.90, 3.90, 4.50, 5.20, 6.00, 7.10$ ms; (b) 气泡与粒径为 1.0—2.0 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 1.30, 1.75, 2.30, 3.00, 4.40, 5.60, 6.00, 6.40, 7.00$ ms

后气泡中部继续收缩, 上部变小形成明显的“蘑菇状”气泡, 最终气泡从顶部分裂成两个气泡, 分裂后上部气泡较小, 下部气泡较大, 产生方向相反的射流, 上部气泡向上运动, 下部气泡直接被吸入沙粒底面. 粒径为 1.0—2.0 mm, 2.0—5.0 mm, 7.0—10.0 mm 的沙子与气泡相互作用的现象则接近于刚性壁面, 即在膨胀阶段, 沙粒底面对气泡的影响比较小, 气泡基本呈球形; 在坍塌阶段, 气泡从上而下开始坍塌, 在沙粒底面的作用下产生朝向沙粒底面的射流, 没有环状射流出现, 说明了沙粒底面边界的刚性效应. 由于篇幅限制, 图 4 仅给出了 $d \approx 9.70$ mm 时气泡与粒径为 0.5—1.0 mm 和 1.0—2.0 mm 的沙子的相互作用.

3.1.4 $d \approx 14.55$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用

当 $d \approx 14.55$ mm 时, 粒径为 0.1—0.25 mm, 0.25—0.5 mm, 0.5—1.0 mm, 1.0—2.0 mm, 2.0—5.0

mm, 7.0—10.0 mm 的沙子与气泡的相互作用大体相同, 沙粒底面的起伏现象不明显, 在膨胀阶段, 沙粒底面对气泡的影响比较小; 在坍塌阶段, 气泡从上而下开始坍塌, 在沙粒底面的作用下产生朝向沙粒底面的射流, 没有环状射流出现. 由于篇幅限制图 5 仅给出了 $d \approx 14.55$ mm 时气泡与粒径为 2.0—5.0 mm 和 7.0—10.0 mm 的沙子的相互作用.

对以上现象进行总结发现, 气泡在与沙粒底面的相互作用中, 会产生明显不同的两种现象, 即与近刚性壁面类似的单向射流气泡以及“蘑菇状”双向射流气泡, 在第一种情况中, 沙粒底面提供了近似刚性的边界条件, 在气泡膨胀阶段对气泡运动起阻碍作用, 在气泡坍塌阶段对气泡起吸附作用, 气泡从上而下开始坍塌形成朝向壁面的射流. 在第二种情况下, 气泡提供了类似弹性介质的边界条件, 在气泡膨胀阶段, 沙粒底面受到气泡冲击而下陷, 在气泡坍塌阶段, 沙粒底面边界

回弹, 气泡从下而上开始坍塌, 在气泡表面产生从下到上的环形扰动, 这种扰动传递到气泡将近顶部时, 在气泡上部形成环状射流, 这股射流将气泡从顶部分裂成两个气泡, 分裂后上部气泡较小, 下部气泡较大, 产生方向相反的射流, 上部气泡向上运动, 下部气泡直接被吸入沙粒底面. 总之, 当气泡与沙粒底面的距离较远时, 沙粒底面表现出刚性特征, 形成朝向壁面的射流, 这是由于

气泡在沙粒底面的 Bjerknes 力作用下气泡下部回流速度较慢、顶部回流较快产生的; 当气泡与沙粒底面的距离较近时, 沙粒底面表现出弹性特征, 形成“蘑菇状”气泡, “蘑菇状”气泡撕裂形成两个气泡, 随后产生两个反方向的沿轴线方向的射流, 这是由于沙粒底面回弹导致在气泡靠近边界一端两侧形成高压区, 该高压区的存在导致气泡下方靠近边界一端两侧回流速度较大引起的.

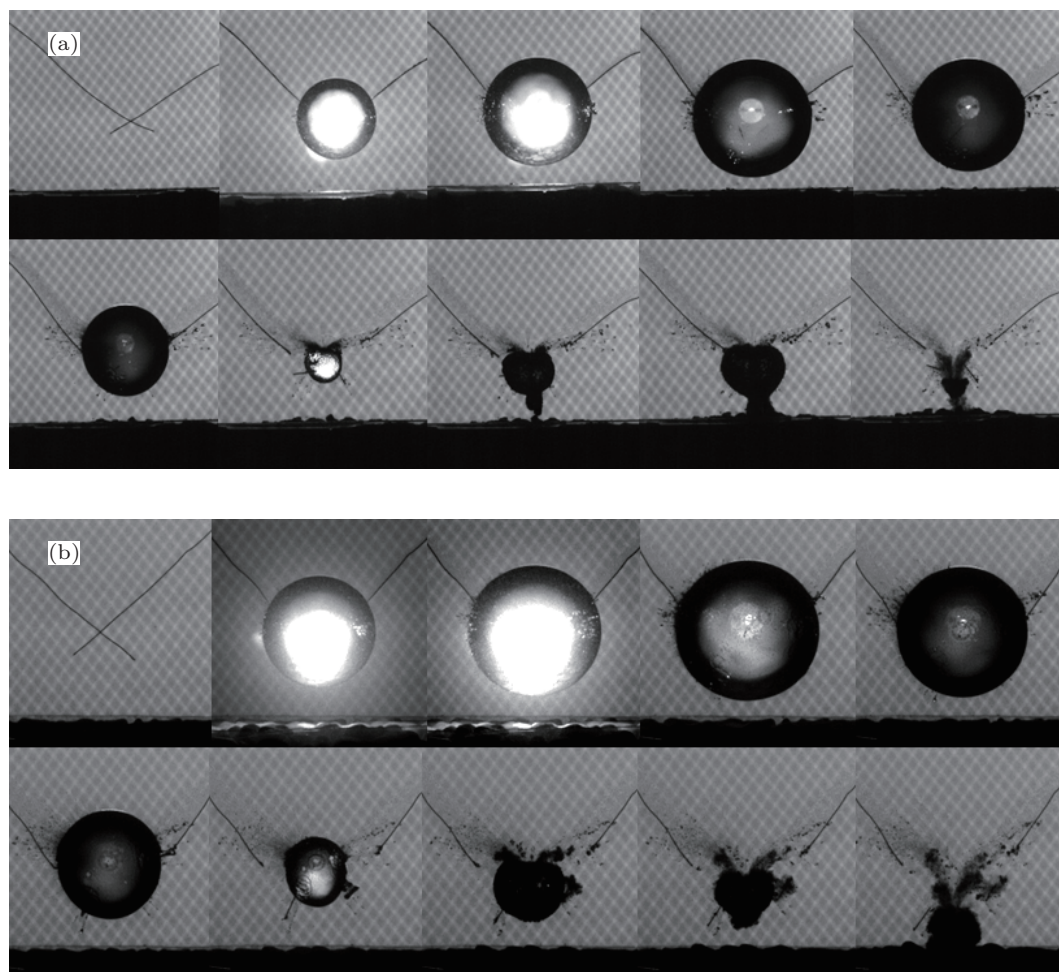


图5 $d \approx 14.55$ mm 时气泡与不同沙粒底面的相互作用 (a) 气泡与粒径为 2.0—5.0 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 0.90, 1.50, 2.20, 3.15, 3.55, 4.05, 4.25, 4.70, 5.30$ ms; (b) 气泡与粒径为 7.0—10.0 mm 的沙子的相互作用, 对应时刻 $t = 0, 1.10, 1.70, 2.45, 3.35, 3.90, 4.45, 5.25, 5.70, 7.00$ ms

3.2 不同沙粒底面对气泡脉动特性的影响

3.2.1 对气泡射流的影响

在大量实验的基础上, 通过改变气泡与沙粒底面的距离, 对不同沙粒底面进行系列试验, 得到气泡射流形态与不同沙底粒径之间的关系如图 6 所示. 图中实线表示产生环状射流与直接产生朝向沙粒底面射流的分界线. 当位于实线上方时, 气泡与沙粒底面相互作用时形成前面所述的第一种情况,

即气泡脉动过程与近刚性壁面相似产生朝向沙粒底面的射流; 当位于实线下方时, 气泡脉动过程中产生带有环状射流的“蘑菇状”气泡, 随后分裂为上下非对称的两个气泡, 并产生朝向相反方向的射流; 当位于实线附近时, 形成的环状射流极其不稳定, 发生的现象不明显且具有一定的随机性.

从图 6 可以看出, 对于不同的沙粒底面, 随着沙底粒径的减小, 能够使气泡产生环状射流的距离范围变大, 即粒径越小, 越容易产生“蘑菇状”气泡,

粒径越大,越容易产生朝向沙粒底面的射流.这一点也可以解释为粒径越小,沙粒底面边界的弹性特征表现得越明显,越容易产生类似于气泡与弹性边界相互作用的现象;粒径越大,沙粒底面边界越接近于刚性壁面,也因此越容易产生朝向沙粒底面的射流.这是因为沙底粒径越小,沙粒的质量越小,气泡坍塌引起的沙粒底面边界回弹越容易发生并且回弹越明显,从而越容易表现出弹性特征,反之亦然.

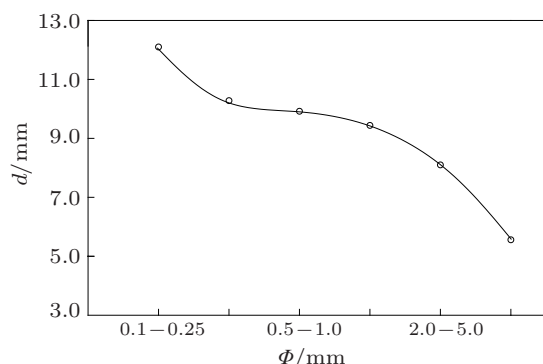


图6 气泡射流方向与沙底粒径之间的关系

3.2.2 对气泡脉动周期的影响

通过对实验测量得到的不同沙底粒径、不同距离条件下的气泡脉动周期进行总结,得到不同沙粒底面时气泡脉动周期随气泡与沙粒底面的距离的变化规律,如图7所示,图中散点为实验值,曲线为实验值的拟合线.从图中可以看出,对于不同沙底粒径时气泡脉动周期随气泡与沙粒底面的距离的变化趋势基本一致,即随着距离的增大,气泡脉动周期先增大然后减小,存在气泡脉动周期峰值.对于不同的沙粒底面边界,随着沙底粒径的增大,出现气泡脉动周期峰值的距离越小.

由前面的讨论可知,当气泡与沙粒底面的距离较小时沙粒底面具有弹性效应,随着气泡与沙粒底面的距离的增大,沙粒底面表现出刚性壁面的性质. Hung 和 Hwangfu^[4] 总结给出了不同边界条件下气泡脉动周期随气泡与边界距离的变化规律,对于弹性边界,距离较小时气泡脉动周期随距离的增大而增大;对于刚性壁面,气泡脉动周期随距离的增大而减小.在距离较小时,随着距离的增大气泡脉动周期增大,与上述弹性边界的周期变化规律类似,说明沙粒底面具有弹性效应;在距离较大时,随着距离的增大气泡脉动周期减小,与上述刚性边界的周期变化规律类似,说明沙粒底面具有刚性效应.

由于在沙粒底面弹性效应和刚性效应的分界线附近气泡极其不稳定,所以存在气泡脉动周期峰值.因此,气泡脉动周期峰值出现对应的距离与沙粒底面弹性效应和刚性效应的分界线紧密相关.

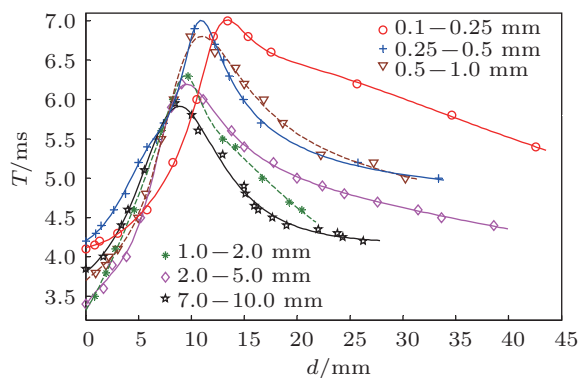


图7 气泡脉动周期随气泡与沙粒底面的距离的变化规律

4 结论

本文利用电火花气泡实验装置,研究了不同沙粒底面边界条件下气泡的运动特点,通过对比分析,得到以下结论.

1) 气泡与沙粒底面的相互作用中,会产生明显不同的两种现象,即与近刚性壁面类似的单射流气泡以及“蘑菇状”双向射流气泡.针对第二种情况,在气泡坍塌阶段,沙粒底面边界回弹导致在气泡靠近边界一端两侧形成高压区.该高压区的存在导致气泡下方靠近边界一端两侧回流速度较大,形成侧面较长中间变细的圆柱形气泡,而后气泡中部继续收缩形成环状射流并向上运动,最终形成上下两个非对称气泡.顶部气泡形成向上的射流背离沙粒底面,而底部气泡则形成向下的射流.

2) 在对不同沙粒底面进行系列试验的基础上,得到了产生环状射流与直接产生朝向沙粒底面射流的分界线.当位于分界线上时,气泡脉动过程与近刚性壁面相似,产生朝向沙粒底面的射流;当位于分界线下时,气泡脉动过程中产生带有环状射流的“蘑菇状”气泡,随后分裂为上下非对称的两个气泡,并产生朝向相反的射流;当位于分界线附近时,形成的环状射流极其不稳定,发生的现象不明显且具有一定的随机性.

3) 对于不同的沙底,粒径越小越容易产生“蘑菇状”气泡,粒径越大越容易产生朝向沙粒底面的射流,即粒径越小,沙粒底面边界的弹性特征表现的越明显,越容易产生类似于气泡与弹性边界相互

作用的现象; 粒径越大, 沙粒底面边界越接近于刚性壁面, 越容易产生朝向沙粒底面的射流.

4) 对于不同沙底粒径时气泡脉动周期随气泡与沙粒底面距离的变化趋势基本一致, 即随着距离的增大, 气泡脉动周期先增大然后减小, 存在气泡脉动周期峰值. 对于不同的沙粒底面边界, 随着沙底粒径的增大, 出现气泡脉动周期峰值的距离减小.

5) 在气泡与沙粒底面的距离较小时, 沙粒底面

具有弹性效应, 随着距离的增大, 气泡脉动周期增大; 在距离较大时, 沙粒底面具有刚性效应, 随着距离的增大, 气泡脉动周期减小. 在沙粒底面弹性效应和刚性效应的分界线附近, 气泡极其不稳定, 造成了气泡脉动周期峰值的出现, 气泡脉动周期峰值出现对应的距离与沙粒底面弹性效应和刚性效应的分界线紧密相关.

-
- [1] Blake J R, Gibson D C 1981 *J. Fluid Mech.* **111** 123140
 - [2] Pearson A, Cox E, Blake J R, Otto S R 2004 *Eng. Anal. Bound. Elem.* **28** 295313
 - [3] Blake J R, Gibson D C 1987 *Ann. Rev. Fluid Mech.* **19** 99123
 - [4] Hung C F, Hwangfu J J 2010 *J. Fluid Mech.* **651** 5580
 - [5] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, Wang C W, Khoo B C, Boyce P, Debono S, Charlier H 2005 *J. Fluid Mech.* **537** 387413
 - [6] Brujan E A, Keen G S, Vogel A, Blake J R 2002 *Phys. Fluids* **14** 8592
 - [7] Hung C F, Lin B J, Hwangfu J J, Hsu P Y 2009 *Ocean Eng.* **36** 564557
 - [8] Turangan C K, Ong G P, Klaseboer E, Khoo B C 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 054910
 - [9] Brujan E A, Nahen K, Schmidt P, Vogel A 2001 *J. Fluid Mech.* **433** 283314
 - [10] Klaseboer E, Khoo B C 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 58085811
 - [11] Klaseboer E, Turangan C K, Khoo B C 2006 *Int. J. Multiphase Flow* **32** 11101122
 - [12] Dadvand A, Khoo B C, Mohammad T 2009 *Exp. Fluids* **46** 419434
 - [13] Kling C L 1970 *Ph. D. Dissertation* (Ann Arbor: University of Michigan)

Experimental study of the interactions between a pulsating bubble and sand particles with different diameters^{*}

Zhang A-Man Xiao Wei[†] Wang Shi-Ping Cheng Xiao-Ou

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

(Received 19 March 2012; revised manuscript received 9 August 2012)

Abstract

The interactions between a spark generated bubble and sand particles with different diameters are studied in this paper using a high speed camera. And distance between the bubble and sand particle is varied. The experimental results show that there are two distinct phenomena during the interaction between the bubble and sand particle. On the one hand, the jet formed is much like that near a rigid wall; on the other hand, a mushroom-shape bubble will form, which will split into two bubbles and two jets with opposite directions along the axes will be generated afterwards. Thus, it is found that the sand particle has the characteristics of a rigid wall and an elastic material. In addition, as the distance d between the bubble and sand particle increases, the pulsating period of the bubble will rise to a peak before it reduces. For different sand particles, the distance corresponding to the peak decreases as the diameter of sand particle increases.

Keywords: bubble, diameter of sand particle, electric spark, jet

PACS: 47.55.dd, 47.54.De, 47.85.Dh

DOI: 10.7498/aps.62.014703

^{*} Project supported by the Science Fund for Outstanding Youth of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51222904), the National Security Major Basic Research Program of China (Grant No. 613157), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50939002), and Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. NCET100054).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaoweihrbu@gmail.com