

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0415

球体入水空泡演变和运动特性影响试验研究*

王 恒¹, 孙铁志¹, 路中磊², 张桂勇^{1,3,4}, 宗 智^{1,3,4}

(1. 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 北京机电工程总体设计部, 北京 100854;

3. 大连理工大学工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

4. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 为了探究表面粗糙度对球体入水空泡演变及运动特性的影响, 基于实验室开放水槽试验系统, 选取了 5 种表面粗糙度的球体, 使用高速摄像机记录入水过程, 并得到了各个球体的入水空泡、喷溅的演变过程以及运动特性的变化。发现入水空泡和喷溅的闭合都会给球体一个负方向的加速度。通过对比不同表面粗糙度球体的位移、速度、加速度曲线, 发现表面粗糙度最大的球体在砰击阶段结束后, 其速度会明显小于其他球体, 并且表面粗糙度对球体运动的影响主要体现在入水早期。分析了上述各球体的入水空泡闭合后, 与自由面相连的空泡的收缩运动, 发现其收缩速度和加速度曲线均会出现极大值点, 呈现出球体表面粗糙度越大出现得越早的趋势。

关键词: 表面粗糙度; 入水; 空泡演变; 运动特性

中图分类号: O352

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

当结构物以一定速度进入水中时, 会在水面下形成一个不断发展的气腔, 称为入水空泡, 同时还会在水面上形成一个与入水空泡相连通的、厚度很小的喷溅^[1], 入水空泡对结构体跨介质运动有重要影响, 如船体砰击、鱼雷入水和航天器回收等。目前, 关于入水问题的研究仍是学者们关注的热点问题^[2]。

Worthington^[3] 首先对入水空泡进行了研究, 他利用高速摄像技术记录下了球体入水空泡形态。May^[4] 发现表面不净的球体相较于表面洁净的球体入水时更容易产生入水空泡, 这种现象与球体表面受到何种污染无关。Duclaux 等^[5] 研究了球体自由入水所产生的入水空泡从产生到溃灭的变化过程, 提出了空泡形态随时间变化的理论模型。Duez 等^[6] 针对不同材质、尺寸、入水初速度、表面亲疏水性, 表面粗糙度很小的球体进行了大量的试验研究, 提出了球体产生入水空泡的临界速度理论。Truscott 等^[7] 和 Techet 等^[8] 开展了一系列关于带有一定旋转角速度的球体低速垂直入水, 以及半亲水半疏水表面球体自由入水试验研究。Aristoff 等^[9] 研究了一系列尺寸较小的疏水性球体在不同速度下的入水过程, 给出了空泡的四种闭合方式, 分别为准静态、浅闭合、深闭合以及表面闭合。马庆鹏等^[10] 针对不同入水初速度和表面沾湿性的球体垂直入水进行了试验研究, 分析了球体运动过程中运动参数的变化。孙钊等^[11] 使用数值方法研究了表面润湿性对球体入水空泡的影响, 发现入水早期形成的液体薄层是影响随后产生空泡形态的关键因素, 并给出了描述入水空泡生成的临界速度与表面接触角关系的经验公式。黄超等^[12] 在 Aristoff 等^[9] 的基础上研究了一定邦德数范围内超疏水小球的入水过程, 发现在邦德数极小时会发生漂浮振荡现象, 指出超疏水小球的入水及空泡动力学行为主要与韦伯数有关。

根据前人所做的工作可以总结出, 结构体表面润湿性的差异会导致入水空泡形态的不同。表面润湿性可使用表面接触角进行表征^[13], Young^[14] 提出了理想光滑表面的表面接触角的计算方法, 即计算材

* 收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(51709042, 51579042); 中国博士后科学基金(2018M631791); 青年千人项目(D1007001); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT18RC(4)018, DUT2017TB05); 辽宁省自然科学基金(20180550619)

第一作者: 王 恒(1996—), 男, 硕士研究生, wangheng96@mail.dlut.edu.cn;

通信作者: 孙铁志(1986—), 男, 博士, 讲师, suntiezh@dlut.edu.cn。

料本征接触角的杨氏方程。对于粗糙表面的表面接触角, Cassie 等^[15] 和 Wenzel^[16] 给出了两种预测模型, 这两种模型预测的表面接触角均与物体的表面粗糙度有关^[17], 可知表面粗糙度会影响表面润湿性, 进而影响结构体的入水过程。

现有的关于表面润湿性对球体入水过程影响的研究多数是基于亲疏水性不同的球体开展的, 而对于表面粗糙度对球体在入水过程的影响, 相关研究较少, 且表面粗糙度影响下空泡演变机理及运动特性需要进一步明确。本文中, 通过试验研究的方式, 探讨表面粗糙度对球体入水过程中的现象、球体自身的运动特性以及入水空泡和喷溅演化的影响, 以期研究成果可为涉及入水冲击问题的研究提供参考。

1 试验装置

试验装置主要由水箱、支撑架、释放机构、导轨组成, 如图 1 所示。水箱采用钢化有机玻璃制成, 长、宽、高分别为 1.5、0.8、1.0 m, 试验水深为 0.7 m。高速摄像机型号为 Phantom v12.1, 试验过程采用 1 280 × 800 的分辨率、3 000 s⁻¹ 的拍摄帧率。试验所用球体为标准台球, 主要由酚醛树脂制成, 每颗台球直径为 57.2 mm, 质量为 (170 ± 5) g。试验球体的表面采用粗糙度分别为 80#、180#、240#、360#、500# 的砂纸进行打磨, 这些砂纸的表面粗糙度 R_a 值分别为 1.6、0.8、0.4、0.2、0.1 μm。为方便描述, 下文均用砂纸的表面粗糙度代表对应的球体表面粗糙度。

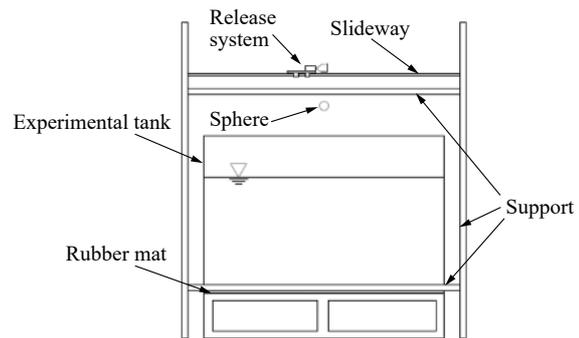


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2 试验结果与分析

2.1 球体垂直入水过程的现象和运动特性

图 2 展示了入水初速度为 3.7 m/s, 表面粗糙度为 80# 的球体从砸击水面到离开视场的全过程。定义球体底部与自由面接触的时刻为零时刻, 接触点为坐标原点, 竖直向下为正方向, 以下所有描述及图片中均采用该定义。

首先观察自由面以下的流动变化, 即入水空泡的演变过程。图 2(a)~(b) 为砸击阶段和流动形成阶段, 球体砸击水面, 将自身的动能及势能传递给附近水域的流体质点, 使其具有了充分的向外运动的动能。图 2(c)~(e) 为开空泡阶段, 球体完全没入自由面以下, 自由面至球体底端范围内附近的流体质点继续向外运动, 到达一定程度时形成开口空腔即空泡, 并不断向外发展, 其与外部水域的分界面称为空泡壁。图 2(f)~(i) 为空泡闭合阶段, 空泡壁上的流体质点向外运动的过程中, 其动能逐渐转化为势能, 当动能全部转化完成后, 空泡直径不再增加, 空泡壁在外部水域压力的作用下加速向内收缩, 最终在某一深度空泡壁收缩至一点, 发生空泡的深闭合。图 2(j)~(n) 为空泡闭合后的阶段, 包括形成射流、球体尾部空泡脱落以及闭合点上方空泡的收缩等现象。在空泡闭合后, 随即自闭合点形成向上和向下的两股射流, 向上的射流朝自由面高速运动, 底端与上方收缩的空泡相连并随之运动。向下的射流向球体运动, 冲击球体上表面并对附着在球体尾部的空泡壁面产生扰动, 之后在浮力等的共同作用下球体尾部空泡呈现为云状并逐渐脱落。

然后观察自由液面以上的流动变化, 即喷溅的演变过程。图 2(a)~(d) 为喷溅形成及发展阶段, 球体砸击自由液面, 在开空泡的同时也使得自由面附近的流体质点获得向上的速度形成喷溅, 随着球体下落, 更多的流体质点向上运动, 使喷溅的高度及直径逐渐增大。图 2(e)~(g) 为喷溅闭合的阶段, 由于重力、表面张力和开口处空气动力的共同作用, 喷溅中的流体质点的动能逐渐减小, 开始向内收缩, 并在某

一时刻和高度位置发生闭合, 形成拱形圆顶, 将空泡与外界封闭。图 2(h)~(n) 为拱形圆顶坍塌阶段, 该阶段又可以细分为 3 个连续的阶段。第 1 阶段为图 2(h)~(i), 该阶段空泡还未发生闭合, 拱形圆顶的尺寸无明显变化, 仅受到回落水流的冲击。第 2 阶段为图 2(j)~(l), 空泡发生深闭合, 上端空泡壁向自由面运动, 由于拱形圆顶仍处于封闭状态, 在内部气压增大、表面张力以及重力的复合作用下, 拱形圆顶高度减小, 整体的直径增大, 该阶段末期拱形圆顶顶端受到射流的冲击, 但仍处于闭合状态。第 3 阶段为图 2(m)~(n), 随着拱形圆顶的直径进一步增大, 表面张力不能再使其保持闭合状态, 出现开口使空泡再次与外界连通, 此后在重力、表面张力等的共同作用下拱形圆顶的高度继续降低, 直径进一步增大, 最终回落至水面。

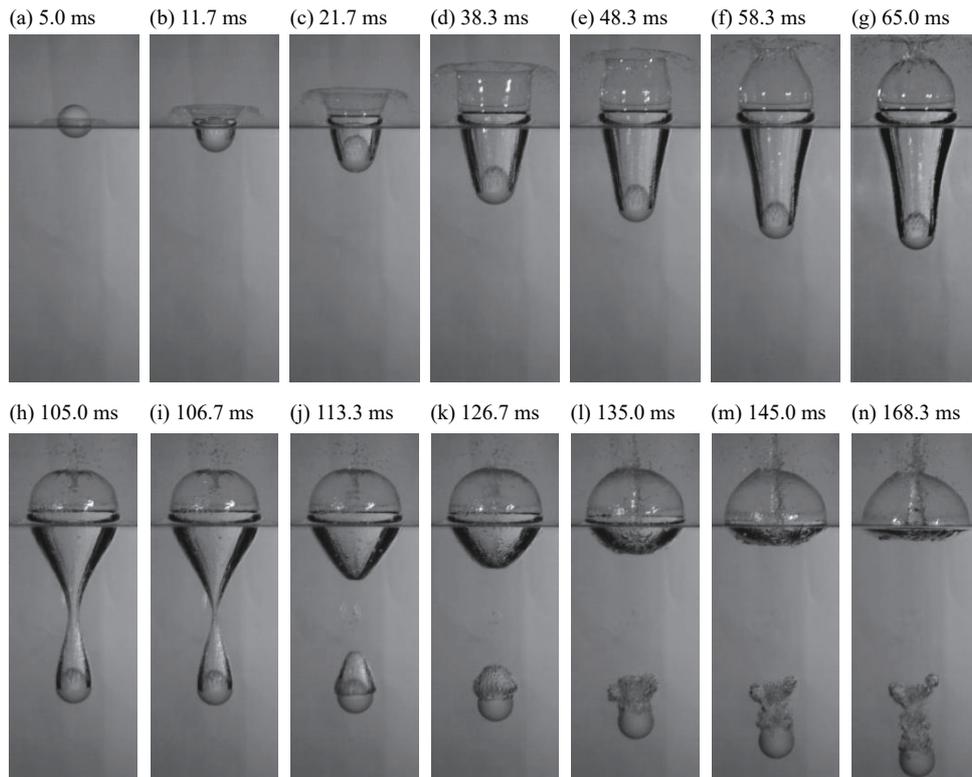


图 2 球体入水过程空泡形态演变

Fig. 2 Cavity evolution during the water-entry process of the sphere

下面对同一工况下球体的运动特性进行分析。记录整个过程中球体顶端的坐标点, 通过换算得到实际位移, 采用八阶多项式拟合得到球体的位移 d 随时间 t 变化的曲线, 然后对其分别求一阶、二阶导函数, 即可得到相应的球体速度 v 、加速度 a 随时间 t 变化的曲线, 如图 3 所示。

从图 3(a) 可以看出, 整个过程中球体的速度并不是均匀减小的, 并且图 3(b) 显示加速度-时间曲线共有 3 个极值点, 分别用 A 、 B 、 C 表示, 对应速度-时间曲线中的 3 个拐点。 A 点在 38 ms 左右, 在此之前加速度的值不断减小, 说明球体受到的负方向力, 主要是阻力逐渐减小, 该点对应图 2(d) 的状态, 此时仍处在开空泡阶段, 但可以观察到喷溅已经具有闭合的趋势, 因此可以推断球体在该阶段的运动和喷溅的形态有一定的关系。 B 点在 68 ms 左右, 处于空泡闭合阶段早期, AB 段球体的加速度增大, 说明在该过程中球体受力增大, 但根据球体入水运动中阻力系数的计算公式^[8], 随着球体速度减小, 阻力应当会进一步减小, 因此在这一阶段中有另外的负方向力增大, 且其增幅要大于阻力减小的幅度, 可以看到此点对应图 2(g) 的状态, 此时喷溅发生了闭合, 因此 AB 段就是喷溅闭合的全过程, 说明了喷溅闭合会使得球体加速度的值增大。 C 点在 148 ms 左右, 对应图 2(m), 此时加速度接近于零, 说明球体受力接近平衡状态, 即球体所受重力近似平衡于球体所受浮力和总阻力的合力。此外, BC 段入水空泡跨越了闭合以及尾部

空泡脱落两阶段, 球体加速度逐渐减小, 并且在空泡闭合时刻加速度曲线出现了拐点, 说明空泡闭合后球体尾部附着空泡会给球体提供一个负向的加速度。

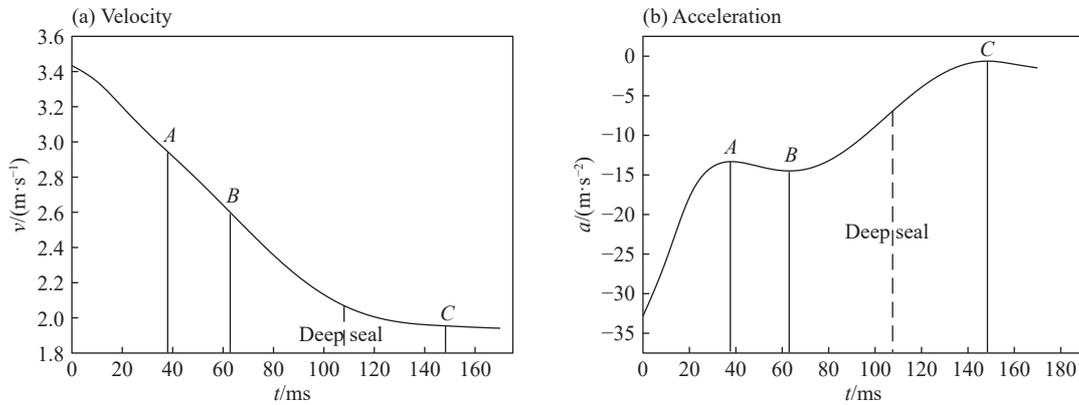


图 3 球体下落的速度和加速度变化

Fig. 3 Drop velocity and acceleration of the sphere varying with time

2.2 表面粗糙度对球体运动特性的影响

各工况的几个特定时刻的试验现象以及整个过程中的运动特性曲线如图 4~5 所示。下面根据图 4~5 分析试验球体在同一入水初速度下, 仅表面粗糙度不同时入水过程中发生的现象和各自运动特性的区别。

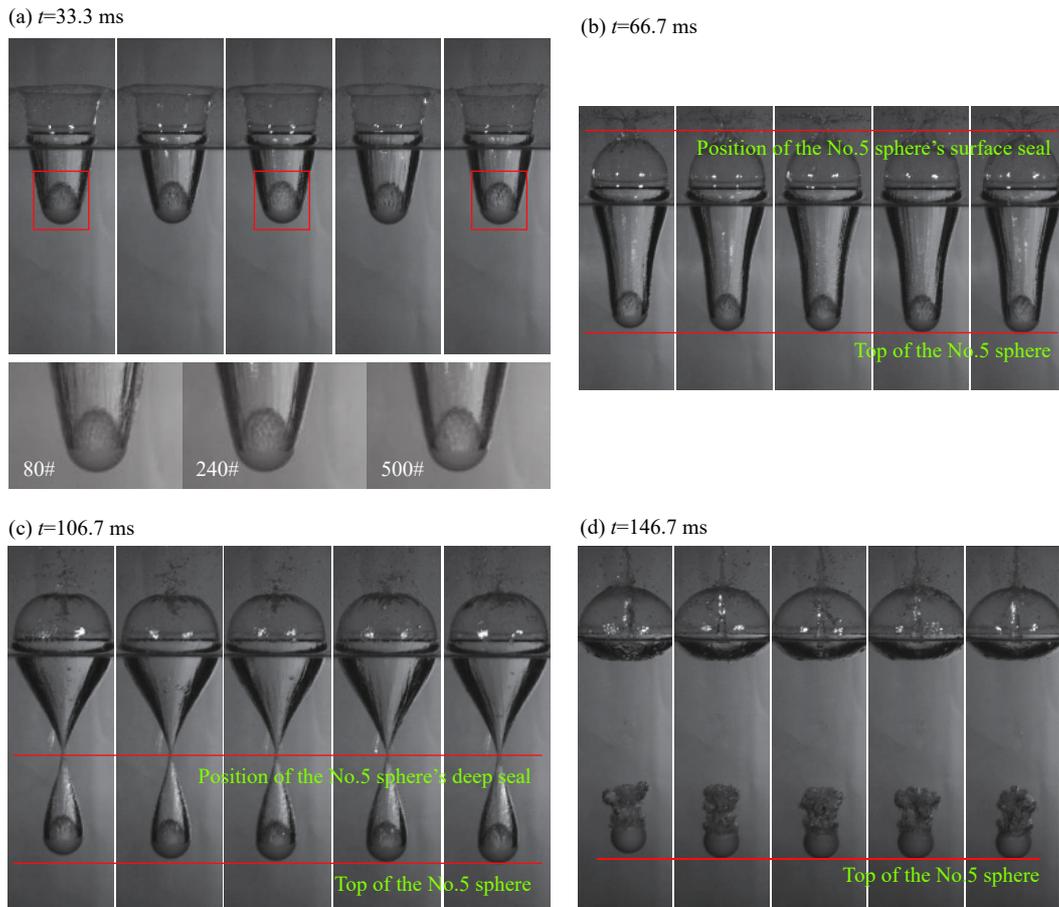


图 4 不同表面粗糙度球体的入水过程空泡形态对比

Fig. 4 Comparisons of the cavity shapes in the water-entry process among the spheres with different surface roughnesses

图 4 中球体的表面粗糙度从左至右依次为 80#、180#、240#、360#、500#, 将它们分别命名为球体 1~5, 各球体的入水初速度均为 3.7 m/s。图 4(a) 在 3.1 节所述的 A 点附近, 可以看出喷溅形态相似, 球体的位移没有明显的区别。对表面粗糙度分别为 80#、240#、500# 的 3 个球体产生的入水空泡进行放大, 可以看出较粗糙的球体产生的空泡表面有大量沿空泡壁方向的条纹, 使得空泡壁不光滑, 而较光滑的球体产生的空泡表面条纹数量少, 空泡壁整体较光滑, 且有随粗糙度减小、空泡壁更光滑的变化趋势。实际上空泡壁面特性与球体的表面润湿性密切相关, Duez 等^[6] 使用纳米涂层让球体表面具有疏水性, 但球体表面粗糙度仍然很小, 其文中给出的该球体入水后 15 ms 的图像如图 5 所示。从图 5 可以看出, 其空泡壁上也存在较多明显的条纹, 说明条纹的产生主要与球体的表面润湿性有关, 并不直接受到表面粗糙度影响。图 4(b) 在 3.1 节所述的 B 点附近, 可以看出各工况产生的喷溅几乎同时发生闭合, 球体 1 的位移明显可见小于另外的 4 个球体。图 4(c) 为各工况空泡发生深闭合时, 可以看出闭合时刻、闭合点所在深度基本相同, 球体 2 的位移也明显可见小于表面粗糙度较小的另 3 个球体。图 4(d) 在 3.1 节所述的 C 点附近, 各球体空泡脱落的情况基本相同, 可以看出球体 1 的位移明显小于其他工况, 球体 2 的位移也较小。

从以上现象可以总结出, 表面粗糙度对入水球体的运动具有一定的影响, 而对于入水空泡和喷溅没有直接的影响。下面基于图 4 所示各工况下的球体运动特性曲线, 进一步分析发生上述现象的内在机理。

图 6(a) 显示, 入水早期不同工况的球体在整个运动过程中下落的位移差别很小, 在球体砸击水面后约 67 ms, 球体 1 的位移曲线开始与其他工况对应的位移曲线出现较明显的偏差, 而另外 4 个工况球体的位移曲线在整个过程中偏差较小, 在曲线末端表面粗糙度最小的 3 个球体对应的位移曲线非常接近, 球体 1 的位移曲线偏离很明显, 球体 2 的位移曲线也有一些偏离但并不明显, 这说明了只有当表面粗糙度较大时, 球体的入水过程才会受到明显的影响。

图 6(b) 显示, 球体 1 在 20 ms 之后的速度开始逐渐小于其他工况, 取 I、II、III 3 个时刻, 发现球体 1 与球体 5 的速度差在入水过程中略有增大。速度曲线末端, 球体 1 的速度明显小于其他工况, 球体 2 的速度稍小, 另 3 个球体的速度曲线出现交叉, 相互之间偏差较小。

图 6(c) 显示, 各球体在零时刻的加速度呈现出随粗糙度增大而增大的趋势, 随后除球体 1 外, 各球体的加速度曲线迅速接近, 几乎重合, 到开空泡阶段结束时, 各工况的加速度曲线之间间隔已非常小, 这表明了球体的运动过程主要在入水早期会受到明显的影响。所有曲线都会出现 3.1 节中提到的 3 个极值点, 仍以 A、B、C 分别表示, 该图中各竖线的虚线样式与各自对应的工况相同, 为各极值点出现的时刻。各曲线的 A 点所在位置都不同, 较明显的是球体 1 的 A 点较靠后, 比其他工况晚 3~5 ms。球体 5 的 B 点出现的时刻较晚, 球体 1 的稍早。对于 C 点, 球体 1 出现的时刻较晚, 球体 5 的则早很多, 其余 3 个工况基本出现在同一时刻。各曲线 B、C 两点附近局部放大的图像见图 6(d) 和图 6(e)。



图 5 带有纳米涂层的球体入水产生的空泡^[6]
Fig. 5 The cavity produced by a sphere with a nanometric coating after water-entry^[6]

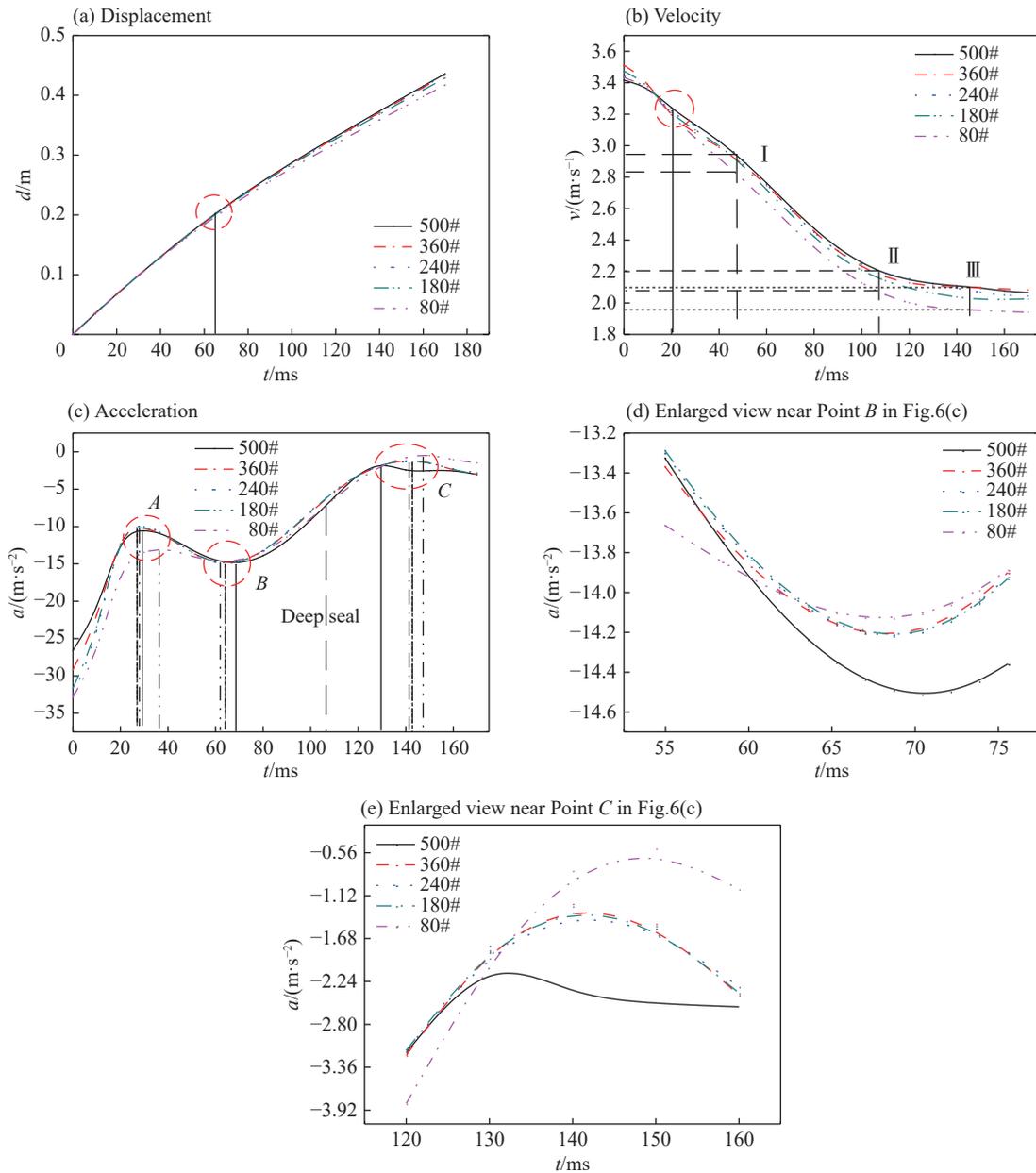


图 6 不同表面粗糙度球体入水过程的运动特性

Fig. 6 Kinetic characteristics of the spheres with different surface roughnesses during the water-entry processes

2.3 球体表面粗糙度对入水空泡收缩的影响

图 2(i)~(n) 表明,空泡闭合后会自闭合点分为上下两部分,其中上方空泡与自由液面相连,在几十毫秒内空泡壁会因表面张力、空泡外的水压等的共同作用而迅速向上运动,此处称之为空泡收缩。图 7 中标出了本段所关注的 3 个运动特征量:空泡的深度 d_c 、收缩速度 v_c 以及收缩加速度 a_c 。上述 3 个运动特征量随时间变化的曲线的获取方式同 3.1 节所述,处理结果见图 8。

如图 8(a) 所示,对于不同表面粗糙度球体产生的入水空泡来说,闭合发生的时刻一致,测量得到的闭合点所处深度在 2 cm 范围内无规律变化,说明闭合深度与球体的表面粗糙度没有明显的联系。随着时间推移,各曲线变化规律不一,出现相互交叉的现象,交叉点附近的局部放大图像见图 8(d)。造成这种现象的原因:一方面可能是测量方式存在误差,另一方面也可能与各工况下空泡在收缩时的差异性有关。

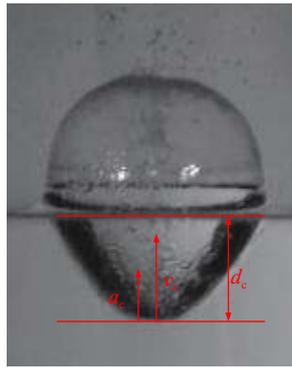


图 7 空泡收缩过程运动特征量定义

Fig. 7 Definition of the motion parameters during the shrinking process of the cavity

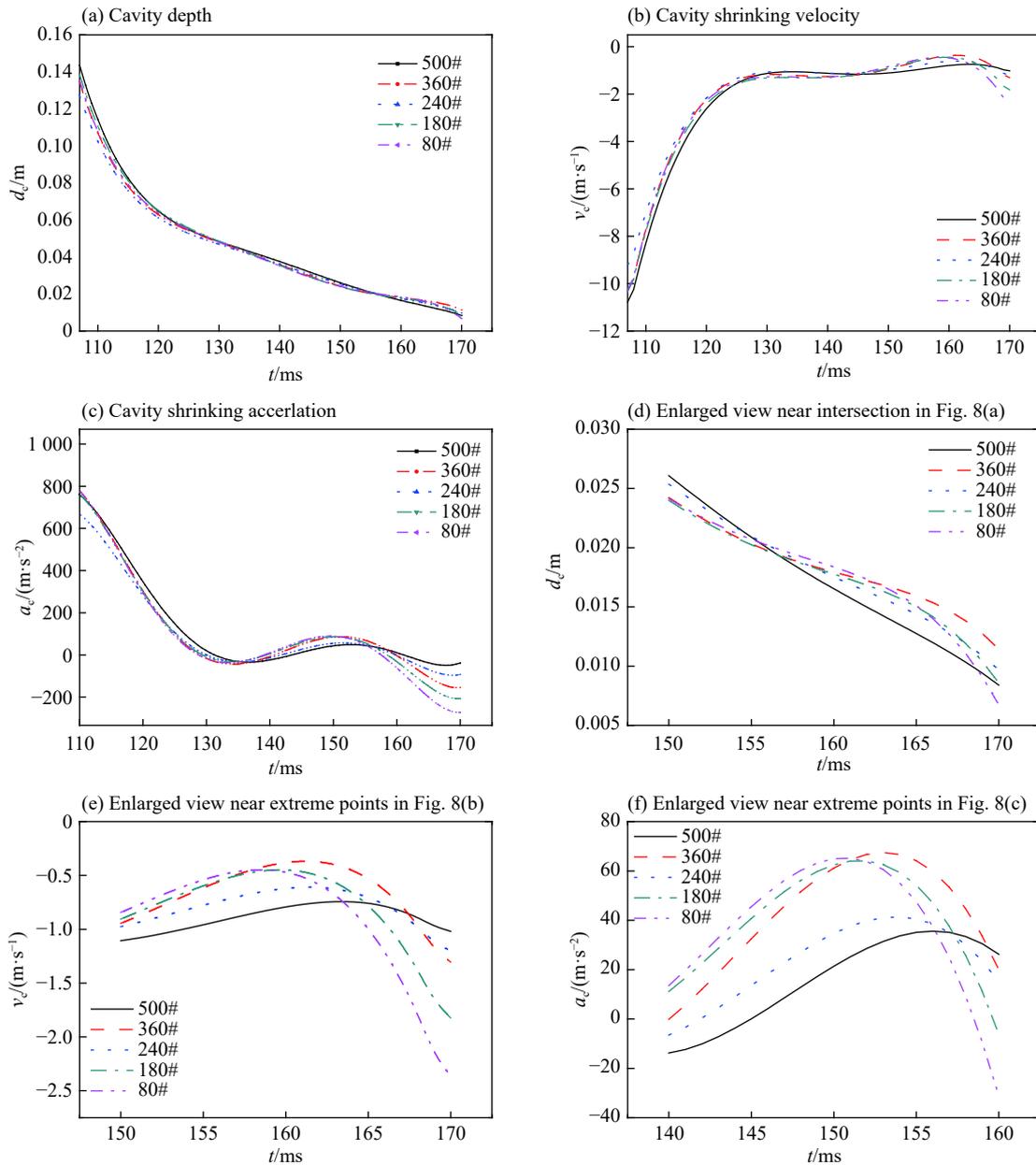


图 8 空泡收缩的运动特征量

Fig. 8 Motion parameters during the shrinking processes of the cavities

由图 8(b) 可以看出, 各工况下空泡的收缩大体都经历了迅速减速、接近匀速、缓慢减速、迅速加速这 4 个连续的过程, 并且各曲线同样会出现相互交叉。值得注意的是, 在速度曲线从缓慢减速到加速的这一过程中均会出现一个极值点, 而各工况的这个极值点的出现时间则呈现出一定的规律, 那就是表面粗糙度越大, 该极值点在时间轴上的位置越靠前, 极值点附近局部放大的图像见图 8(e)。

由图 8(c) 可以看出, 刚发生闭合时加速度的值非常大, 随后迅速减小, 在约 20 ms 的时间里减小到 0 附近, 之后在约 27 ms 的时间内呈现出缓慢增大的趋势, 随后又迅速减小并变为值较大的负数。在增大到减小的转变过程中同样会出现极值点, 和速度曲线类似, 表面粗糙度越大, 该极值点越靠前, 极值点附近局部放大的图像见图 8(f)。并且加速度曲线的末端除球体 3 和球体 4 产生的入水空泡以外, 呈现出随着粗糙度增大, 加速度的值也越大的规律。

3 结 论

(1) 在开空泡阶段和空泡闭合阶段早期, 喷溅的闭合会给球体一个反向的加速度, 使加速度的值增大。空泡闭合后, 球体所受外力会在一定时间内接近平衡状态, 附着在球体尾部的空泡会给球体提供一个反向的加速度。(2) 球体表面粗糙度较大时, 其入水后的位移、速度在一定时间后会明显小于表面粗糙度小的球体, 粗糙度最大和最小的球体的速度差在入水过程中略有增大。进一步对比加速度曲线可以发现表面粗糙度对球体入水的影响主要体现在整个过程早期。(3) 表面粗糙度较大的球体较表面粗糙度较小的球体产生的入水空泡壁面上的条纹更多, 使得空泡表面不光滑, 且有随着表面粗糙度减小, 空泡表面越光滑的趋势, 但条纹的产生主要与球体表面润湿性有关, 并不直接受到表面粗糙度影响。(4) 空泡闭合后, 与自由面相连的空泡会发生收缩, 并经历迅速减速、接近匀速、缓慢减速、迅速加速这 4 个过程。在空泡收缩的最后阶段, 出现了随着球体表面粗糙度增大, 速度和加速度曲线的极值点更靠前以及速度和加速度的值也相应增大的趋势。

参考文献:

- [1] MARSTON J O, TRUSCOTT T T, SPEIRS N B, et al. Crown sealing and buckling instability during water entry of spheres [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 794: 506–529. DOI: 10.1017/jfm.2016.165.
- [2] 王永虎, 石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3): 276–282. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2008.03.014.
WANG Yonghu, SHI Xiuhua. Review on research and development of water-entry impact problem [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3): 276–282. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2008.03.014.
- [3] WORTHINGTON A M. A study of splashes [M]. New York: Longmans, Green, and Company, 1908.
- [4] MAY A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity [J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(10): 1219–1222. DOI: 10.1063/1.1699831.
- [5] DUCLAUX V, CAILLÉ F, DUEZ C, et al. Dynamics of transient cavities [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 591: 1–19. DOI: 10.1017/S0022112007007343.
- [6] DUEZ C, YBERT C, CLANET C, et al. Making a splash with water repellency [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(3): 180–183. DOI: 10.1038/nphys545.
- [7] TRUSCOTT T T, TECHET A H. Water entry of spinning spheres [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 625: 135–165. DOI: 10.1017/S0022112008005533.
- [8] TECHET A H, TRUSCOTT T T. Water entry of spinning hydrophobic and hydrophilic spheres [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(5): 716–726.
- [9] ARISTOFF J M, BUSH J W M. Water entry of small hydrophobic spheres [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 619: 45–78. DOI: 10.1017/S0022112008004382.
- [10] 马庆鹏, 何春涛, 王聪, 等. 球体垂直入水空泡实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(2): 174–180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.

- MA Qingpeng, HE Chuntao, WANG Cong, et al. Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 174–180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.
- [11] 孙钊, 曹伟, 王聪, 等. 表面润湿性对球体入水空泡形态的影响研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(4): 670–676. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.014.
- SUN Zhao, CAO Wei, WANG Cong, et al. Effect of surface wettability on cavitation of sphere during its water entry [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(4): 670–676. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.014.
- [12] 黄超, 翁翕, 刘谋斌. 超疏水小球低速入水空泡研究 [J]. *力学学报*, 2019, 51(1): 36–45. DOI: 10.6052/0459-1879-18-310.
- Huang Chao, Weng Xi, Liu Moubin. Study on low-speed water entry of super-hydrophobic small spheres [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 36–45. DOI: 10.6052/0459-1879-18-310.
- [13] LEE J. Treatise on process metallurgy [M]. Elsevier Science, 2014.
- [14] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65–87. DOI: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [15] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of Faraday Society*, 1944, 40(1): 546–551.
- [16] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988–994. DOI: 10.1021/ie50320a024.
- [17] 吉肖, 贾志海, 蔡小舒. 规则微观结构粗糙表面浸润性研究 [J]. *材料导报*, 2013, 27(14): 142–146. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2013.14.038.
- Ji Xiao, Jia Zhihai, Cai Xiaoshu. Study on the wetting behavior of rough surfaces with regular microstructures [J]. *Materials Review*, 2013, 27(14): 142–146. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2013.14.038.

Experimental study on the cavity evolution and motion characteristics of spheres into water

WANG Heng¹, SUN Tiezhi¹, LU Zhonglei², ZHANG Guiyong^{1,3,4}, ZONG Zhi^{1,3,4}

(1. School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. System Design Institute of Mechanical-Electrical Engineering, Beijing 100854, China;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

4. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: Water-entry experiments were carried out by adopting five kinds of surface roughness to explore the effects of surface roughness of water-entry spheres on the evolution of cavities induced the water-entry of the spheres and the motion characteristics of the spheres during the water-entry process of the spheres. The experiments were based on an open water-tank test system. Meanwhile, a high-speed camera was used to record the water-entry processes of the spheres with different surface roughness. The evolutions of cavity, splash and motion characteristics of each sphere were obtained. It is found that the closure of cavity and splash will exert a negative acceleration on the sphere. By comparing the displacement, velocity and acceleration curves of the spheres with different surface roughness, it is found that the sphere with the largest surface roughness will move significantly slower than other spheres after the end of slamming, and that the effects of surface roughness on the sphere motion are mainly reflected in the early period of the water-entry. By analyzing the shrinkage of the cavities connected with the free surface of each sphere after cavity seal, it is found that both the shrinking velocity and acceleration curves take on extreme points, and that the larger the surface roughness of the spheres, the earlier the extreme point appears.

Keywords: surface roughness; water-entry; cavity evolution; motion characteristics

(责任编辑 张凌云)