

加热球体入水空泡实验研究

李佳川 魏英杰 王聪 邓环宇

Water-entry cavity of heated spheres

Li Jia-Chuan Wei Ying-Jie Wang Cong Deng Huan-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面能梯度驱动下纳米水滴在不同微结构表面上的运动

Motion of the nanodrops driven by energy gradient on surfaces with different microstructures

物理学报.2015, 64(6): 064703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064703>

零质量射流激励下诱发液体相变及其格子 Boltzmann 方法模拟

Phase transition in liquid due to zero-net-mass-flux jet and its numerical simulation using lattice Boltzmann method

物理学报.2014, 63(2): 024702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024702>

小攻角下三维细长体定常空化形态研究

Cavitation shape of the three-dimensional slender at a small attack angle in a steady flow

物理学报.2013, 62(20): 204701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204701>

疏水表面减阻环带实验研究

Investigation about drag reduction annulus experiment of hydrophobic surface

物理学报.2013, 62(15): 154701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154701>

具有密度跃层分层流体中回转体激发内波特性实验

The characteristics of internal waves generated by a revolution body in a stratified fluid with a pycnocline

物理学报.2012, 61(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.074701>

加热球体入水空泡实验研究*

李佳川 魏英杰[†] 王聪 邓环宇

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

(2016年4月11日收到; 2016年7月21日收到修改稿)

基于高速摄像方法, 开展了17—800 °C范围内不同温度球体垂直入水实验研究. 呈现了随球体温度变化所产生的复杂入水现象: 在1.5 m/s入水速度条件下, 实验所采用的室温球体不能产生空泡, 当球体温度为300 °C时空泡生成, 增加到400 °C空泡消失, 继续提高温度至700 °C空泡再次形成. 根据传热学与流体动力学理论, 分析了温度与速度变化对空泡形成的影响机理. 结果表明随着温度的升高, 球体与水之间的传热效率与传热方式发生改变, 汽化生成的汽泡和蒸汽膜改变了周围流体流动的湍动性和球体表面的粗糙度、疏水性, 这些变化均会影响空泡的形成; 在1.5—3.8 m/s入水速度范围内, 当球体具有较高温度时, 能否形成入水空泡主要与球体的传热性能有关, 速度的提高增强了球体与水的传热效率, 使高速入水条件下的较低温度球体同低速入水条件下的较高温度球体入水现象相似, 速度本身仅对生成空泡的形态有所影响.

关键词: 加热球体, 入水实验, 入水空泡, 传热方式

PACS: 47.54.De, 47.55.N-, 47.55.dp

DOI: 10.7498/aps.65.204703

1 引言

运动体从空气中穿越自由液面进入水中的过程称为入水过程. 入水过程包含一系列复杂的流动现象, 并常常会在自由液面以下形成一个空腔, 即入水空泡. 入水空泡的存在会对空投鱼雷、入水导弹等武器的结构特性和弹道稳定性产生很大影响, 因此对入水空泡的研究具有重要的军事意义, 受到许多学者的广泛关注. 球体具有很好的对称性且运动的稳定性较好, 所以研究球体入水空泡成为了解入水空泡形成机理及形态特性的重要手段.

影响入水空泡形态特性及其演化过程的因素有很多, 其中外部因素主要有速度, 液体的密度、黏性、表面张力, 大气的压力、密度等^[1-7], 球体的自身性质因素主要包括球体的密度、直径, 球体表面的粗糙度、疏水性等^[8-12]. 上述影响因素已有较多的研究, 除此之外, 球体温度对入水空泡的形成

具有更为复杂的影响. 目前, 仅有Marston等^[13]针对温度对空泡形成的影响进行了研究, 其采用相对于水有较低沸点和汽化潜热的氟化液体, 球体的温度范围为22—240 °C, 研究发现在相同速度条件下室温球体没有产生空泡, 而加热到较高温度的球体形成了空泡, 且与常温条件下疏水性球体产生的空泡形态相似. 此外有少量的学者对高温球体入水的减阻特性与传热特性进行了研究, 但未涉及入水空泡的研究, 其中Zvirin等^[14]对高温球体入水的阻力和传热系数进行了测量, 研究了球体自由落入饱和水和过冷水中的沸腾特性; Gylys等^[15]通过测量不同温度球体在水中下落的平均速度, 证明了高温可以减小球体在水中运动的阻力, 减阻效果在不同温度范围内有所不同; Vakarelski等^[16]采用与Marston等^[13]的研究相似的氟化液体, 实验结果表明, 当球体达到一定温度时阻力系数急剧变小, 超过这一温度, 阻力系数变化幅度减小, 并提出阻力降低的原因是液体汽化在球体表面形成一层蒸

* 黑龙江省自然科学基金(批准号: A201409)、哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(批准号: 2013RFLXJ007)和中央高校基本科研业务费(批准号: HIT.NSRIF.201159)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: weiyingjie@gmail.com

汽膜,使球体尾部的流动分离点后移,减小了压差阻力;在之后的研究中,Vakarelski等^[17,18]对球体表面进行了疏水性处理,使蒸汽膜能够平稳溃灭以提高球体在水中运动的稳定性;Li等^[19]对熔融金属液滴撞击液体冷却剂自由表面的运动特性进行了研究,在撞击的初始阶段,液滴做减速运动,持续一段时间后液滴开始加速,之后液滴再次减速,只是速度衰减的幅度比较小,最终液滴的速度达到稳定值;近期,Marston等^[20]和Ding等^[21]对水面飞溅和气-固-液接触线等问题进行了研究.关于球体入水空泡更细微的表面特性正受到广泛关注.空泡的存在将使金属热处理时冷却不均匀而产生应力集中等问题,因此对于加热球体入水空泡的研究在金属热处理领域也具有重要意义.随着球体温度的升高,水绕球体流动的边界层将发生复杂的变化,边界层状态对航行体水中运行的阻力具有很大影响,因此本文的研究可能为以后提出较新的水下减阻方法做出贡献.

本文对温度范围为17—800 °C球体入水空泡开展了实验研究,由于水的沸点和汽化潜热较高,与Marston等^[13]的研究相比,温度对入水空泡形成的影响更为复杂.随着温度的升高,球体表面粗糙度、疏水性和流动的湍动性发生了变化,这些变化对空泡的形成均具有一定的影响.本文根据传热学与流体动力学理论,并结合相关文献,分析了温度变化对空泡形成的影响机理.本文对1.5—3.8 m/s范围内速度对不同温度球体入水空泡的影响进行了分析,其中330 °C球体在较低速度下可以生成空泡,但随着速度的增加却无法形成空泡,Marston等^[13]曾简单提到相似的反常现象,但却没有给出相应的结果与解释,本文根据实验现象与传热理论对这一现象进行了解释.本文的研究对今后研究温度对入水空泡的影响具有借鉴作用.

2 实验系统及方法

实验系统如图1所示.本文实验采用未经处理的Gcr15轴承钢球体,球体密度 $\rho_s = 7786 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,直径 $D = 25 \text{ mm}$.水槽的尺寸为1.5 m × 0.8 m × 0.9 m,相比球体有较大的尺度,可以忽略边壁效应对入水空泡形态的影响.水槽四周与底部采用强度较高的钢化玻璃,底部铺有厚度为10 mm的橡胶保护层,以防止高温和球体冲击损坏底部玻璃.

水槽四周玻璃上端由铝型材固接,通过连接件在水槽上方搭建具有刻度的铝型材作为标尺,实验时对照标尺由坩埚钳在水槽中心位置的正上方小心地释放小球,实现对球体入水速度的控制.将水在水槽中室温下贮存10 h以上,实验时水温即为室温 $T_w = 17 \text{ }^\circ\text{C}$,水深为0.8 m.

加热设备采用型号为SX2-2.5-10的马弗炉,尺寸为200 mm × 120 mm × 80 mm,并通过镍硅热电偶外接精度为1 °C的温度控制器,所能达到的最高温度为1000 °C.该设备的控温方式为通断式控温,即当温度达到设定温度时停止加热,当温度低于设定温度时开始加热.由于温度的升高与降低都有一个缓冲的过程,因此加热时偏离设定温度的幅度较大.为了使温度稳定,人为观察温度值进行通断电操作,经过反复试验,能够使加热温度稳定在设定温度的 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内.达到设定温度后维持30 min,当实时温度显示为设定温度时立即用坩埚钳将球体取出,并快速释放.加热球体在空气中的冷却速度较慢,且球体在空气中历经的时间较短,因此本实验可以忽略球体在空气中降温的影响.

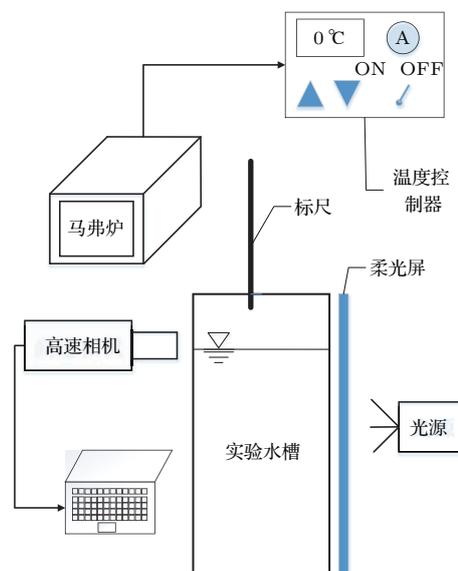


图1 实验系统示意图

Fig. 1. Schematic of the water-entry experiment.

实验采用Photron FASTCAM SA-X型高速摄像机对球体入水现象进行拍摄,拍摄帧率为2000 fps.为达到良好的光照效果,实验中使用一组9 × 500 W的点阵光源通过柔光屏散射后照射水域,并将两盏1000 W新闻灯布置在水槽的左右两侧作为补充光源.对每种情况下的入水过程均进行

了三次以上的拍摄, 本文所采用的图片能够反映多次重复实验中同样的入水形态特性.

3 实验结果分析

3.1 不同温度球体入水空泡实验分析

为探究温度对球体入水空泡的影响, 本文采用 17—800 °C 温度范围内的球体进行垂直入水实验, 入水速度为 1.5 m/s. 不同温度下球体入水形态如图 2 所示, 其中被加热到 100 与 200 °C 的球体同 17 °C 的室温球体具有相同的入水形态. 为了尽可能多地显示出不同入水时间下的形态变化情况, 同一温度下并没有保持图片之间具有完全相同的时间间隔. 从图 2 中可以看到, 不同温度下球体具有不同的入水形态特性.

球体撞击水面后, 一层溅水膜将沿球体表面上运动, 这层溅水膜能否与球体表面发生分离将影响球体入水空泡的形成. 同一温度下的首张图片对应球体触水后 5 ms 时刻, 图中箭头指向溅水膜流动到球体表面的位置. 入水 5 ms 时, 17 °C 球体表面的溅水膜较其他温度实验更加靠近球体的顶端, 沿球体表面流动的距离比较长, 且没有与球体表面发生分离. 在此后的时间内, 溅水膜一直沿球体表面运动, 直至完全入水前, 溅水膜在球体顶端碰撞. 此时溅水膜在球体表面封闭, 没有空隙产生, 因此没有形成入水空泡. 随后, 球体表面完全触水, 液面有水柱涌起. 100 与 200 °C 球体如同 17 °C 球体均没有产生入水空泡, 虽然 200 °C 已经高于水的沸点, 但水的过冷度较高, 球体周围水的汽化现象较弱, 没有使球体表面性质发生改变, 因此该温度下依然没有产生入水空泡.

300 °C 球体入水时, 汽化产生的离散汽泡不断脱离球体表面, 造成对周围水体的强烈扰动, 增强了流动的湍动性, 使溅水膜与球体表面分离, 随后溅水膜继续向四周扩散, 与球体表面之间形成一个空腔, 即为后期运动的入水空泡. 随球体运动周围流体持续被排开, 球体的动能转化为周围水的动能, 空泡开始扩张, 当扩张到一定程度时, 空泡内外的压力差使空泡收缩, 直至发生深闭合. 闭合的压力使少量的汽泡脱离出来, 同时产生向上与向下的射流, 并使分开的两个空泡发生收缩. 向上的射流使上方的空泡产生剧烈的波动, 并形成较高的喷溅, 向下的射流撞击在球面上使空泡产生左右方向

的剧烈扰动, 这种扰动最终将导致空泡的溃灭. 在整个运动过程中, 空泡始终没有发生表面闭合, 原因是球体的入水速度较低, 流入空泡内的空气的速度较低没有使表面空泡内外产生足够的压力差使空泡顶端收缩.

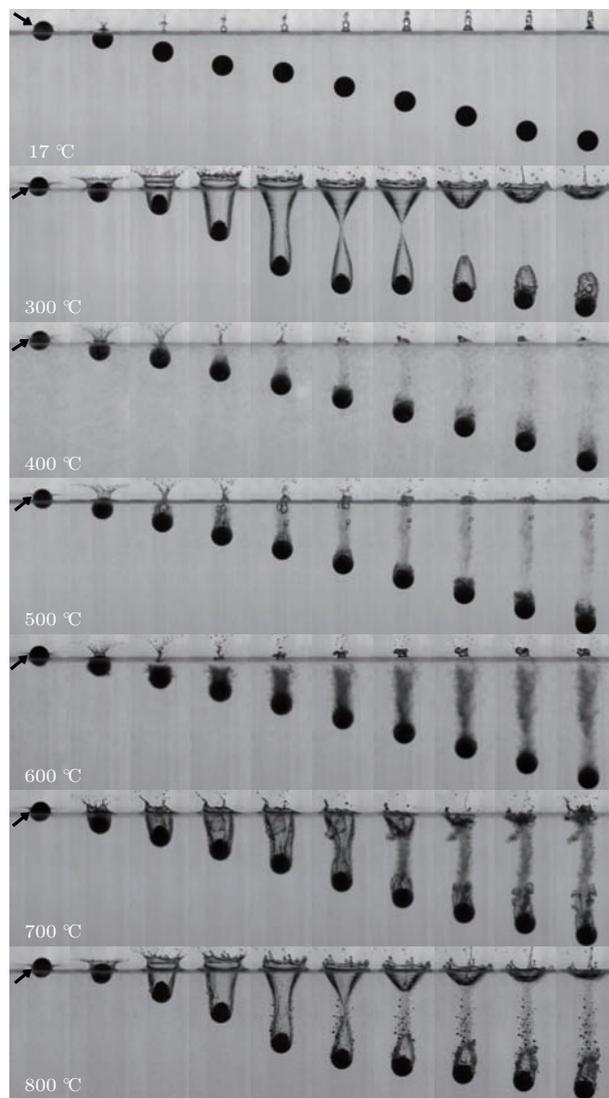


图 2 1.5 m/s 入水速度条件下不同温度球体入水形态

Fig. 2. Water-entry characteristics of spheres with different temperatures.

随着被加热温度的升高, 球体附近水的汽化增强, 球体表面生成较多均匀的细小汽泡, 其中细小汽泡与文中所述的空泡为两种不同物质, 细汽泡是由于高温使水汽化产生的, 空泡是由于溅水膜分离使球体入水夹带空气形成的. 含有汽泡的流动降低了球体所受到的摩擦阻力 [22], 使球体变得光滑, 而光滑的球体不易产生空泡 [10], 导致了入水 5 ms 时, 400 与 500 °C 球体的溅水膜并没有与球体表面发生分离形成入水空泡. 此时球体表面流动仍具有较

强的湍动度, 因此球体入水前溅水膜没有像 17 °C 球体入水时的溅水膜那样汇聚到球体顶端发生闭合, 球体完全入水后与溅水膜闭合位置之间夹带着少量的空气, 观察第二张图片可以看到 400 °C 球体的溅水膜是分叉的而 500 °C 球体的溅水膜连接为一个曲面, 因此 500 °C 球体夹杂的空气较多, 从后面的几张图片可以看到有分散的气泡脱落. 球体的上端存在着水汽化产生的气泡云, 开始由于溅水膜闭合的影响, 气泡云呈流线型, 随着入水深度的增加, 气泡云呈现直筒型. 由于传热效率的不同, 500 °C 球体所产生气泡云的密度要大于 400 °C 球体, 其中贴近球体颜色较深的部分为球体入水时夹带的空气溃灭所形成的空气泡. 当球体被加热到 600 °C, 球体与水的传热性能进一步加强, 气泡云的密度变大. 虽然球体入水前溅水膜并没有闭合, 但由于生成的气泡较多, 强烈的扰动使溅水膜破裂, 因此在入水初期汽化成的气泡云便呈现直筒型.

下面结合图 3 所示的不同壁面过热度对应的沸腾区域示意图来说明图 2 所示不同温度球体与水的传热方式. 图 3 所示为电加热不锈钢细管置入饱和水中, 随壁面温度升高而呈现的不同沸腾过程, 其中 Δt 为壁面过热度, 即不锈钢壁面温度 t_w 与饱和水温度 t_s 之差, q 为热流密度. 本实验所采用的水具有较大过冷度, 因此相同壁面温度条件下生成的气泡较小, 且每种沸腾状态所涵盖的温度范围更广. 当球体温度小于或略超过水的饱和温度时, 周围的水不会发生汽化, 此时的传热方式为对流传热. 当球体温度大于水的饱和温度时 (300 °C 球体), 壁面上个别位置开始产生气泡, 此阶段对应于图 3 所示核态沸腾区域的孤立气泡区, 由于该阶段生成的气泡为孤立的, 且实验中水的温度较低, 因此图 2 所示的 300 °C 球体无法生成容易观察的气泡云, 但此时相比于低温球体, 生成了入水空泡, 所以可以认为球体的表面特性发生了较大的改变, 即可证明有气泡存在. 随着 Δt 进一步增大, 水的汽化程度增强, 此时气泡的扰动剧烈, 增强了球体与水的能量传递, 热流密度急剧增大, 从图 3 中可以看出, 热流密度越大产生的气泡越多, 图 2 所示 400—600 °C 球体产生的气泡云密度随温度的升高而增大, 对应于图 3 所示的核态沸腾区域的中后期, 核态沸腾的终点热流密度达到峰值. 从峰值继续增大 Δt , 气泡汇聚在一起, 形成不稳定的蒸汽膜,

相比于水, 蒸汽的传热能力较差, 因此热流密度随 Δt 的增加而减小, 该区域对应的传热方式为过渡沸腾传热 (不稳定膜态沸腾传热), 700 °C 球体相比于 600 °C 球体所生成的气泡云密度变小, 但减小的幅度不是很大, 因此 700 °C 球体传热方式对应于图 3 所示的过渡沸腾的早期阶段, 由于实验中采用水的过冷度较高, 产生的蒸汽膜比较薄, 因此很难观察到蒸汽膜的存在. 当球体温度达到 800 °C 时, 蒸汽膜趋于稳定, 气泡云的密度急剧减小, 因此该阶段处于过渡沸腾的末期阶段或稳定膜态沸腾的早期阶段. 达到稳定膜态沸腾阶段后, 热辐射传热占主要地位, 该传热方式不需要物体之间的相互接触, 辐射力的大小与温度的四次方成正比, 因此随着 Δt 的升高, 热流密度将大幅度增大, 该阶段超出了本文的研究范围, 在今后的研究中可以进一步分析.

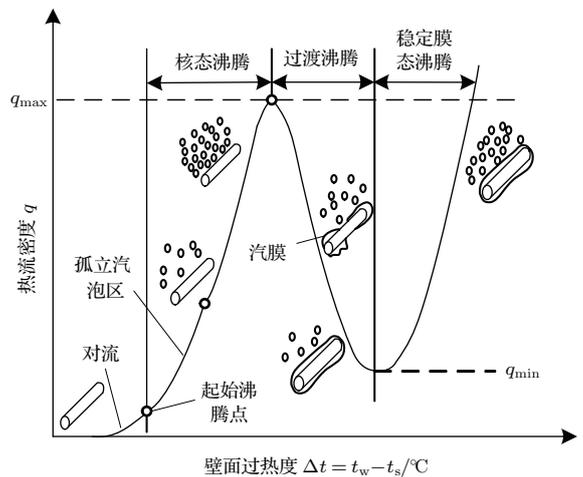


图 3 不同壁面过热度对应的沸腾区域示意图
Fig. 3. Boiling regions of different wall superheat.

低黏度的液滴撞击固体表面产生反弹的条件是固体表面是疏水的, 而将固体表面加热到远高于液滴沸点的温度, 当液滴撞击固体表面时, 不会立即汽化而是在液滴与固体表面之间形成一层蒸汽膜, 并使液滴反弹, 可以看作蒸汽膜增强了固体表面的疏水性^[23]. 本文实验蒸汽膜与液滴撞击高温壁面产生的蒸汽膜原理相似, 因此具有一定的弹性, 一定程度上增强了球体的疏水性, 使溅水膜能够与球体表面发生分离, 并形成入水空泡. 700 °C 球体生成的蒸汽膜很不稳定, 因此形成的空泡也较不规则. 随着球体被加热温度继续升高, 当达到 800 °C 时, 蒸汽膜趋于稳定, 生成的空泡形态也比

较规则. 图中夹杂的黑色颗粒为球体在高温下生成的氧化铁皮遇冷水脱落所致. 空泡形态与 300 °C 球体入水形成的空泡形态相似, 由于氧化铁皮的脱落, 可能对空泡壁面的光滑程度造成一定的影响.

通过提取拍摄图片球体底端的像素点得到如图 4 所示的 1.5 m/s 入水速度条件下, 不同温度球体入水深度随时间的变化曲线图, 其中 0 时刻对应球体触水时刻. 从图中可以看到, 相同时间内, 室温与 100 °C 球体入水较浅, 入水深度随时间的变化曲线基本重合, 随着球体温度的升高, 球体的入水深度增加, 不同温度球体入水深度的增加幅度不同. 可以表明, 高温可以减小球体在水中运动时所受到的阻力, 只是在不同温度范围内的减阻效果不同. 入水空泡的存在, 球体表面湍动性、粗糙度和疏水性的改变, 对阻力均有一定的影响, 而球体下落过程中温度随时间急剧衰减. 因此为分析温度对球体减阻效果的影响, 还需要测量每一时刻球体的温度与阻力值, 并进行深入的研究.

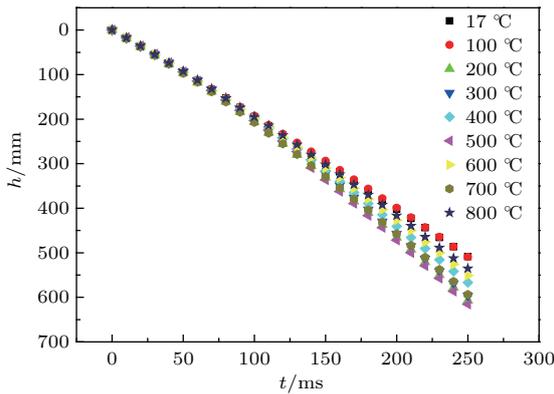


图 4 (网刊彩色) 不同温度球体入水深度随时间变化曲线
Fig. 4. (color online) Water-entry depths of different temperature spheres depending on falling time.

3.2 速度对不同温度球体入水空泡的影响

本文开展了 1.5—3.8 m/s 范围内速度对不同温度球体入水空泡的影响研究. 图 5 为不同入水速度的 17 °C 球体入水相同深度的空泡形态对比图. 当入水速度为 1.5 m/s 时, 球体入水并没有产生空泡. 随着速度的增大, 球体传给周围水的动能增大, 且球体表面流动的湍动度增加, 溅水膜更容易与球体发生分离, 当入水速度为 2.7 m/s 时, 溅水膜闭合时产生的空间较小, 球体入水形成较不规则的小空泡, 并很快发生溃灭. 当入水速度为 3 m/s 时, 溅水膜闭合(空泡表面闭合)后, 空泡脱离水面随着球体一起向下运动, 形成稍大的空泡, 此后空泡尾部

溃灭, 产生向下的射流最终导致整个空泡的溃灭. 速度增大到 3.8 m/s 时, 球体入水产生较大的空泡, 首先发生了表面闭合, 但空泡尾部并没有随着球体向下运动, 空泡壁面扩张后开始收缩直至发生深闭合.

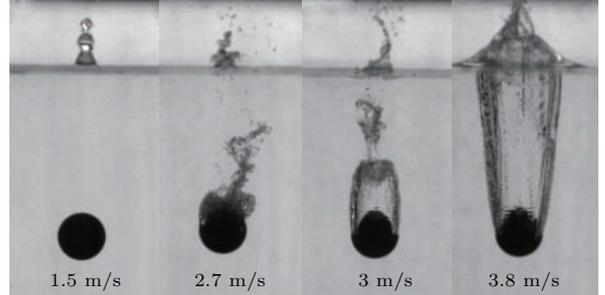


图 5 不同入水速度下 17 °C 球体入水形态对比
Fig. 5. Water-entry characteristics of 17 °C sphere with different impact velocities.

图 6 为不同入水速度的 300 °C 球体入水相同深度的空泡形态对比图. 该图展现了在可以形成空泡的条件下, 速度对空泡形态特别是闭合方式的影响. 速度较低时, 空泡仅发生深闭合, 并没有发生表面闭合. 速度较高时, 进入空泡内空气的速度较高, 空泡内外产生较大的压力差, 使空泡向内收缩直至发生表面闭合. 所有入水速度条件下的空泡都将发生深闭合. 早期对于空泡深闭合时间的测量发现, 闭合时间与 $\sqrt{D/(2g)}$ 成比例且几乎与入水速度无关. Marston 等^[13]采用相对于水有较低沸点和汽化潜热的氟化液体, 和不同直径的加热球体, 球体接触水面的时刻为 0 时刻, 实验拟合的深闭合时间 $t_{close} \approx 2.09\sqrt{D/(2g)}$. 如图 7 所示, 本文将 300 °C 球体入水空泡深闭合发生的时间同 Marston 等^[13]实验拟合的公式进行对比, 两者符合得很好.

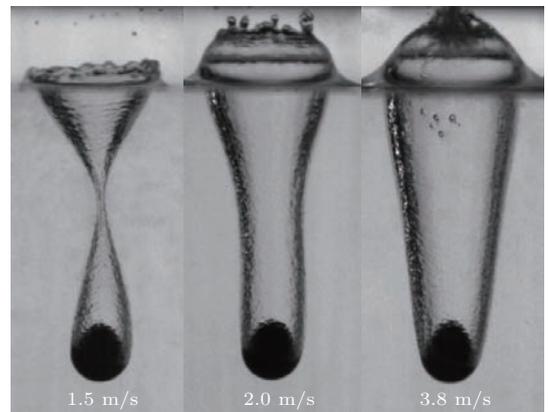


图 6 不同入水速度下 300 °C 球体入水空泡形态对比
Fig. 6. Water-entry characteristics of 300 °C sphere with different impact velocities.

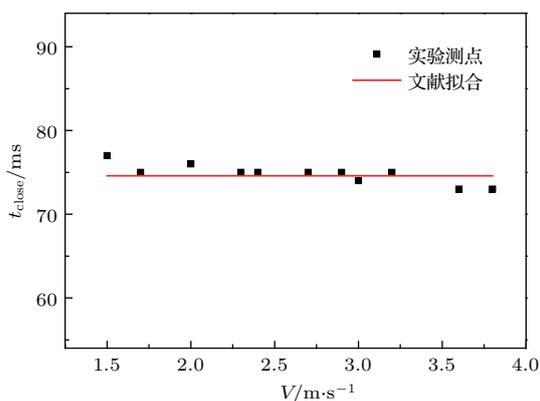


图7 300 °C 球体空泡深闭合时间

Fig. 7. Pinch-off time of 300 °C sphere.

图8为不同入水速度的330 °C球体入水相同深度的形态对比图. Duclaux 等^[24]的研究结果表明亲水与疏水球体形成入水空泡的速度最小值不同, 疏水球体在较低速度下就可以形成入水空泡, 但当两种球体均超过这一速度值时, 随着速度的增加会一直有空泡产生且两者的空泡形态较为一致. 常温情况下不同疏水性与粗糙度的球体均同如图5所示的室温球体一样, 速度越高越容易形成空泡. 330 °C温度下的球体却发生速度较低时形成空泡, 速度较高时无法生成空泡的反常现象. 此时速度本身对空泡的生成影响不大, 而是由于速度的提高增强了球体与水的传热效率^[25], 使低温高速球体同高温低速球体具有相当的传热性能, 330 °C球体在较高速度下与图2所示的400 °C球体在1.5 m/s入水速度下产生的气泡云相似, 速度的提高使当前温度向更高温度情况下的形态发生转化.

图9为不同入水速度的400 °C球体入水相同深度的形态对比图. 随着速度的增加, 始终没有形成完整的空泡. 速度达到3.8 m/s时, 同图2所示的1.5 m/s入水速度条件下500 °C球体产生的气泡云伴随少量空气泡脱落现象相似. 图10为不同入水速度的600 °C球体入水相同深度的形态对比图. 当入水速度为3.2 m/s时, 空泡形态较不规则, 与图2所示700 °C球体类似. 入水速度为3.8 m/s, 可以形成如图2所示800 °C球体较规则的空泡, 只是由于入水速度的影响, 此时的空泡可以发生表面闭合. 结合图8—图10可知, 当球体具有较高温度时, 能否形成入水空泡, 主要与球体的传热性能有关, 速度的提高增强了球体与水的传热效率, 低温高速球体同高温低速球体具有相当的传热性能, 使

高速入水条件下的较低温度球体同低速入水条件下的较高温球体入水现象相似, 速度本身仅对生成空泡的形态有所影响.

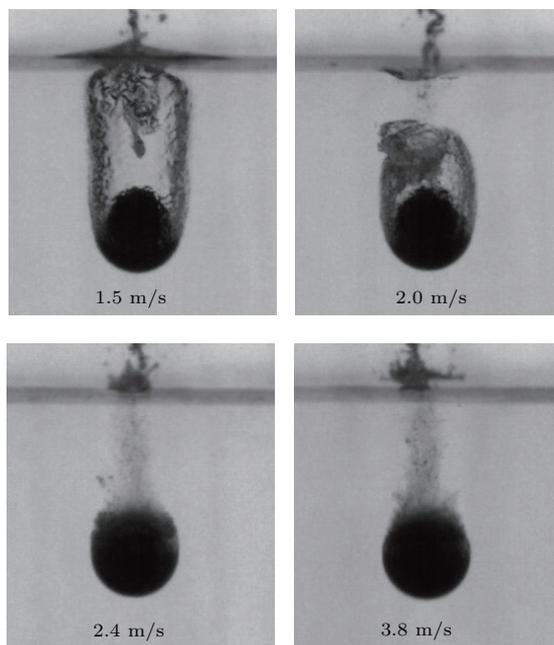


图8 不同入水速度下330 °C球体入水形态对比

Fig. 8. Water-entry characteristics of 330 °C sphere with different impact velocities.

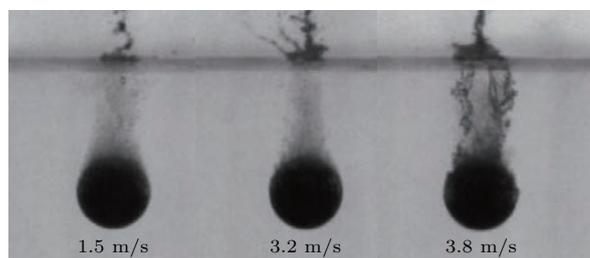


图9 不同入水速度下400 °C球体入水形态对比

Fig. 9. Water-entry characteristics of 400 °C sphere with different impact velocities.

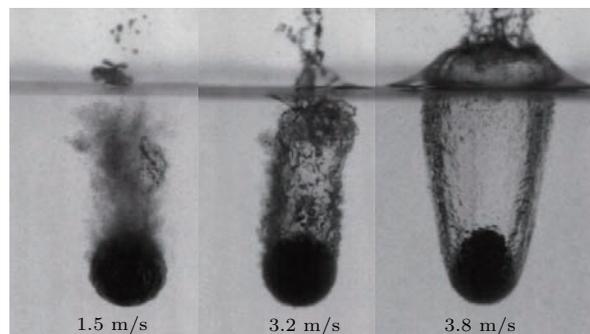


图10 不同入水速度下600 °C球体入水形态对比

Fig. 10. Water-entry characteristics of 600 °C sphere with different impact velocities.

4 结 论

本文首先开展了17—800 °C范围内不同温度球体1.5 m/s入水速度条件下的入水实验,描述了温度对入水空泡的影响,并对影响机理进行了分析,随后对1.5—3.8 m/s速度范围内,速度对不同温度球体入水空泡的影响进行了研究,得到如下结论.

1) 随着温度的升高,球体与水的传热效率与传热方式发生改变,1.5 m/s入水速度条件下的室温球体无法形成空泡,当温度升高到一定程度,球体周围的水开始汽化,起初有较离散的汽泡不断脱离球体表面,使流动的湍动性增强,球体可以形成空泡,当汽化程度加强时,较均匀的汽泡覆盖了球体表面,使球体变得光滑,球体无法形成空泡,温度继续升高,汽泡聚集在一起形成一层蒸汽膜,传热方式从核沸腾转换为膜沸腾,蒸汽膜的存在增强了球体的疏水性,使球体可以形成空泡.

2) 高温可以减小球体在水中运动的阻力,不同温度范围内减阻效果有所差异.

3) 300 °C球体空泡的深闭合时间与速度无关,和 $\sqrt{D/(2g)}$ 成比例且与已有文献拟合公式有很好的符合性.

4) 330 °C球体随着入水速度的增加,出现空泡逐渐减小并消失的反常现象,400与600 °C球体较高入水速度下的空泡形态与1.5 m/s入水速度下较高温度球体产生的空泡形态相似,这些实验结果表明,在1.5—3.8 m/s入水速度范围内,当球体具有较高温度时,能否形成入水空泡,主要与球体的传热性能有关,速度的提高增强了球体与水的传热效率,低温高速球体同高温低速球体具有相当的传热性能,使高速入水条件下的较低温度球体同低速入水条件下的较高温度球体入水现象相似,速度本身仅对生成空泡的形态有所影响.

由于不同温度范围内球体具有不同的入水形态特性,加之沸腾传热的复杂性,本文没有定量地给出温度与速度对入水空泡形成的影响,目前也没有相关理论可以进行定量的描述,还需要开展大量的实验工作,并结合传热学与流体动力学知识,进

行深入的研究.

参考文献

- [1] He C T, Wang C, He Q K, Qiu Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134701 (in Chinese) [何春涛, 王聪, 何乾坤, 仇洋 2012 物理学报 **61** 134701]
- [2] Lu Z L, Wei Y J, Wang C, Sun Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014704 (in Chinese) [路中磊, 魏英杰, 王聪, 孙钊 2016 物理学报 **65** 014704]
- [3] Liu D, He Q, Evans G M 2010 *Adv. Powder Technol.* **21** 401
- [4] Le Goff A, Quere D, Clanet C 2013 *Phys. Fluids* **25** 043101
- [5] Bell G E 1924 *Philos. Mag. J. Sci.* **48** 753
- [6] Gilbarg D, Anderson R A 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 127
- [7] May A 1952 *J. Appl. Phys.* **23** 1362
- [8] Ueda Y, Tanaka M, Uemura T, Iguchi M 2010 *J. Visualization* **13** 289
- [9] May A 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 1219
- [10] Worthington A M, Cole R S 1897 *Philos. Trans. R. Soc. London* **189** 137
- [11] Aristoff J M, Bush J W M 2009 *J. Fluid Mech.* **619** 45
- [12] Duez C, Ybert C, Clanet C, Bocquet L 2007 *Nat. Phys.* **3** 180
- [13] Marston J O, Vakarelski I U, Thoroddsen S T 2012 *J. Fluid Mech.* **699** 465
- [14] Zvirin Y, Hewitt G F, Kenning D B R 1990 *Exp. Heat Transfer* **3** 185
- [15] Gylys J, Skvorcinskiene R, Paukstaitis L, Gylys M, Adomavicius A 2015 *Int. J. Heat Mass Transfer* **89** 913
- [16] Vakarelski I U, Marston J O, Chan D Y C, Thoroddsen S T 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 214501
- [17] Vakarelski I U, Patankar N A, Marston J O, Chan D Y C, Thoroddsen S T 2012 *Nature* **489** 274
- [18] Vakarelski I U, Chan D Y C, Thoroddsen S T 2014 *Soft Matter* **10** 5662
- [19] Li L X, Li H X, Chen T K 2008 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **32** 962
- [20] Marston J O, Truscott T T, Speirs N B, Mansoor M M, Thoroddsen S T 2016 *J. Fluid Mech.* **794** 506
- [21] Ding H, Chen B Q, Liu H R, Zhang C Y, Gao P, Lu X Y 2015 *J. Fluid Mech.* **783** 504
- [22] Elbing B R, Winkel E S, Lay K A, Ceccio S L, Dowling D R, Perlin M 2008 *J. Fluid Mech.* **612** 201
- [23] Biance A L, Chevy F, Clanet C, Lagubeau G, Quere D 2006 *J. Fluid Mech.* **554** 47
- [24] Duclaux V, Caille F, Duez C, Ybert C, Bocquet L, Clanet C 2007 *J. Fluid Mech.* **591** 1
- [25] Ong C L, Thome J R 2011 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **35** 873

Water-entry cavity of heated spheres*

Li Jia-Chuan Wei Ying-Jie[†] Wang Cong Deng Huan-Yu

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 11 April 2016; revised manuscript received 21 July 2016)

Abstract

The present study aims to address the effect of sphere temperature on water-entry cavity. For this purpose, an experiment on vertical water-entry cavity of a heated sphere is conducted by utilizing a high-speed video camera. The temperature of the sphere ranges from 17 °C to 800 °C. The complex flow phenomena of water entry, produced by a change in temperature of a sphere, is obtained for the first time. According to the finding, cavity is not formed around the room temperature sphere under the condition of the impact velocity of 1.5 m/s. When the temperature of the sphere is 300 °C, the cavity appears, while it disappears when the temperature reaches up to 400 °C. Interestingly, cavity appears again as the sphere is heated to a temperature of 700 °C. The degrees of drag reduction of the sphere are different in various temperature conditions. Based on the theory of heat transfer and fluid dynamics, we analyze the mechanism for the influences of temperature and velocity on the forming of cavitation. The results show that the heat-transfer efficiency and heat-transfer mode between sphere and water change with the increase of temperature. Meanwhile the turbulent characteristic around the sphere, the surface roughness and hydrophobicity of the sphere are affected by the bubbles and vapor layer. In consequence, these characteristics influence the formation of cavity. The results of the effect of impact velocity on water-entry cavity reveal that the heat transfer performance plays a significant role in the forming of cavity, while the heat transfer efficiency is improved by the increase of impact velocity. The water-entry characteristics are similar to those in flow field under high temperature at low impact velocity as well as under low temperature at high impact velocity. The flow field of water entry looks similar under 330 °C at high impact velocity as well as under 400 °C at low impact velocity. Thus, an abnormal phenomenon appears. That is to say, the cavity size first decreases, and then disappears with the increase of impact velocity for the sphere at 330 °C. The heat transfer performance can determine whether a cavity forms under the conditions of the impact velocity ranging from 1.5 m/s to 3.8 m/s. Meanwhile, the impact velocity itself can merely affect the cavity shape. The pitch-off time of the 300 °C sphere is irrelevant to impact velocity, which shows a good consistency with the literature result. Also, this research will be conducive to gaining an insight into the complex flow of water-entry with a heated sphere.

Keywords: heated sphere, water-entry experiment, water-entry cavity, heat transfer mode

PACS: 47.54.De, 47.55.N-, 47.55.dp

DOI: 10.7498/aps.65.204703

* Project supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. A201409), the Special Foundation for Harbin Science and Technology Innovation Talents of China (Grant No. 2013RFLXJ007), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. HIT.NSRIF.201159).

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