文章编号: 1001-1455(2014)02-0174-07

球体垂直入水空泡实验研究*

马庆鹏[1],何春涛[2],王 聪[1],魏英杰[1],路中磊[1],孙 健[1]
(1.哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2.北京机械设备研究所,北京 100854)

摘要: 针对球体垂直入水问题开展了实验研究,分析了入水空泡的形成、发展、闭合及溃灭过程。通过开展不同初始入水速度及表面沾湿状态的实验研究,得到了入水速度及表面沾湿状态对球体入水空泡流场的影响,同时分析了球体在垂直入水过程中的位移、速度、加速度以及阻力因数。结果表明,球体在水下的运动参数具有较强的非线性特性,速度较高、入水空泡深闭合的条件下,球体的运动参数及阻力因数曲线具有明显的波动。

关键词: 流体力学;入水空泡;入水;球体;运动参数
中图分类号: O351.2 **国标学科代码**: 1302531 **文献标志码**: A

结构体以一定的初始速度垂直穿越自由液面入水,其周围将形成一个空气层,伴随着结构体下降至自由液面以下,空气层进一步发展成为一个空腔,这个空腔称为入水空泡。入水空泡形成、发展、闭合和溃灭的过程对结构体的运动特性及流体动力特性具有重要的影响。

针对不同结构体的入水问题已开展了诸多研究。A. M. Worthington 等[1]使用闪光照相机观察了球体垂直入水的过程,并定性分析了入水喷溅、表面空泡闭合等入水现象。D. Gilbarg 等[2]研究了不同入水速度和大气压力对球体入水空泡的影响。E. G. Richardson 等[3]研究了直径为 1/5 英寸至 1 英寸的球体从自由液面以上 126 英尺高速自由降落条件下入水空泡的形成,并使用汽油、甘油等溶液替代水,探讨了液体密度对入水空泡发展的影响。A. May 等[4-8]研究了入水速度、大气压力、气体密度、球体尺寸等参数对钢质球体入水空泡的形态及发展过程的影响,并给出了不同尺寸的球体以不同速度入水的阻力因数。T. Miloh[9-11]对球体入水过程的拍击载荷和附加质量等问题开展了大量的理论研究,得到了附加质量随时间变化的函数关系,并由此积分得到了球体入水过程的冲击载荷。T. T. Truscott 等[12-13]针对球体旋转入水问题开展了大量的实验研究,得到了不同旋转角速度条件下球体入水的空泡流动特性,并估算了球体入水过程的升力和阻力。顾建农等[14]开展了球形和普通手枪子弹 2 种弹丸在不同入水角度下倾斜入水的实验,分析了不同形状弹丸入水的弹道稳定性和速度衰减规律。李晓杰等[15]针对∅9 mm 手枪弹头设计了 2 种新的低侵彻弹头,并针对新模型的斜入水问题开展了数值模拟,比较了不同的弹丸模型入水的速度衰减、位移、相对动能及瞬时空腔的变化规律。张伟等[16]利用气体炮和高速相机等设备,开展了不同头型弹体在 35~160 m/s 速度下的入水实验,研究了平头、卵头及截卵形 3 种头型弹体入水的弹道稳定性,并修改了柱形弹体入水速度衰减的数学预报公式,建立了平头弹体入水的空泡形状模型。何春涛等[17]开展了圆柱体低速入水实验,分析了圆柱体垂直、倾斜入水以及串、并列入水时的流动现象,得出了空泡闭合方式与入水速度的关系,以及串列和并列入水时空泡的生成和相互之间的影响。

本文中,对球体在不同初始入水速度和表面沾湿状态下垂直入水开展相关实验,研究球体入水空泡的发展规律,分析初始入水速度和表面沾湿状态对球体垂直入水空泡流动及运动参数的影响。

* **收稿日期**: 2012-09-12; **修回日期**: 2012-12-24
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(HIT. NSRIF. 201159)
作者简介: 马庆鹏(1988—),男,博士研究生。

1　实验系统

在室内进行入水实验，实验系统示意图如图 1 所示。水箱尺寸为 0.8 m×0.5 m×1.0 m，其各面材料均为钢化玻璃，其中 4 个侧壁厚度均为 10 mm，底面厚度为 15 mm，各面之间由酸性硅酮玻璃胶胶合，在水箱底部，铺有 4 层橡胶板，以防止球体撞击水箱底面时可能带来的损伤及破坏。水箱外部有高度可调支架，可实现球体在不同高度的固定及自由释放。采用 Photron FASTCAM SA5 高速摄像机及 Nikon AF Nikkor 28－85 mm 镜头，以 5 000 s^{-1} 的拍摄速度对入水过程进行拍摄记录。实验中水箱后方照明由 4 盏 500 W 钨丝灯组成的 2×2 灯阵提供，侧面布置 2 盏 1 kW 钨丝灯，以保证采光要求。同时在后方光源和水箱之间，竖直布置一层磨砂玻璃，以提供较柔和的光线，从而能够较好地捕捉流场细微结构，得到较优质的图像。用水为城市自来水，水温 19 ℃，注入水箱前用明矾进行 2 次净化处理。实验模型采用标准台球，直径为 57.15 mm，根据不同的实验目的，实验前对球体表面进行相应处理。

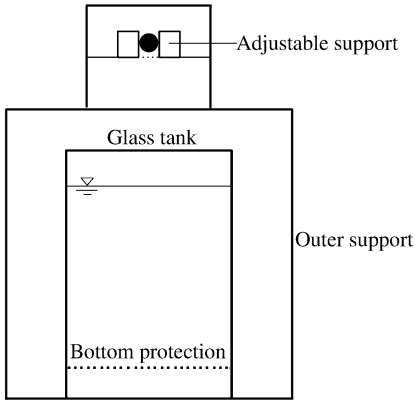


图 1　入水实验系统示意图

Fig. 1　Schematic of the water-entry experiment

2　实验结果及分析

2.1　球体入水空泡流分析

入水空泡从生成到溃灭呈现出复杂而有规律的发展过程，按照相继出现的一些状态和特征，可以划分为流动形成、空泡敞开、空泡闭合、空泡溃灭 4 个阶段，入水过程如图 2 所示。

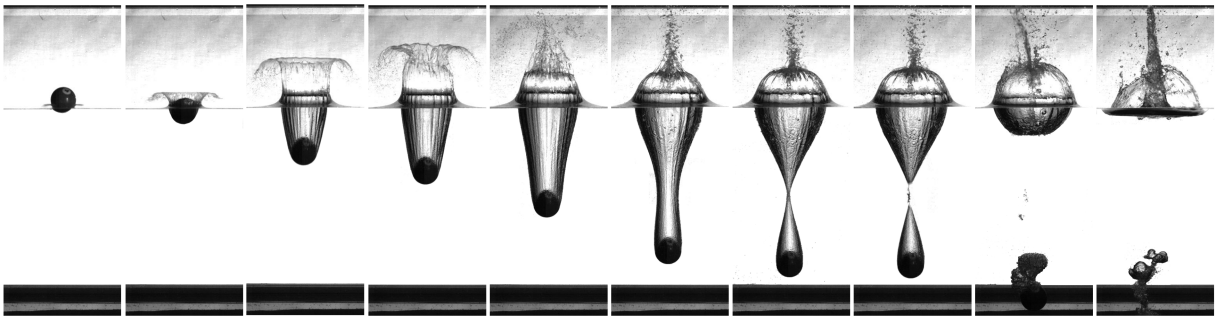


图 2　球体垂直入水空泡的发展过程

Fig. 2　Development of vertical water-entry cavity of sphere

流动形成阶段是指从运动体接触水面到头部完全沾湿，形成稳定、有规律的流场这一过程。在流动形成阶段初期，自由液面上方会产生明显的喷溅现象，如图 2 的前 2 张图所示。在流动形成阶段，随着球体入水深度的增加，喷溅现象逐渐趋于明显，喷溅水膜的厚度慢慢增大，外形变得饱满。但是，在球体头部完全浸湿后，流场不再为喷溅水膜增水[6]，喷溅水膜逐渐变得薄而透明。在表面张力的作用下，喷溅水膜在一定的阶段保持其完整性，此时，球体尾部形成一个敞开的空泡，流动由此进入空泡敞开阶段。

在空泡敞开阶段，随着球体入水深度的增大，空泡被逐渐拉长，如图 3 所示。同时球体在下落的过程中，头部挤压静止的流体，将球体的动能传递给球体前部流体质点，流体质点因此获得垂直于球体表面的运动速度和加速度。该速度方向经过极短的一段时间后转变为横向，流体质点也就被排挤到球体外侧的流域。因此，在空泡敞开阶段，入水空泡在被拉长的同时还伴随着径向扩张。

随着球体进一步向下运动，喷溅水膜逐渐增大，在表面张力、大气密度、空泡口空气的流动等多种因素的共同作用下迅速向中间收缩，形成一个类似于凸起的钟罩形状的封闭面，阻止了外部空气的进入，

这种封闭模式称为表面闭合。在此之后,随着空泡继续拉长,空泡内的压强逐渐降低,周向扩张的流体在动能完全转化为周围流体压力势能后开始反向运动,空泡开始收缩并逐渐在水下轴线上的某一点闭合,这种闭合形式称为深闭合。空泡从表面闭合到深闭合这一过程称为空泡闭合阶段。

当空泡深闭合于轴线上的一点后,整个空泡被分为 2 个封闭区域并迅速分离,分别向自由液面和球面收缩并逐渐溃灭,同时形成 2 股高速射流,如图 4 所示。

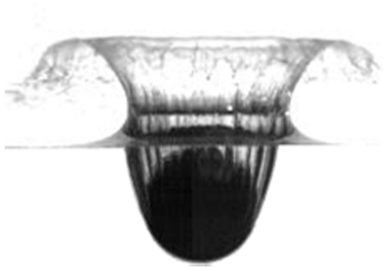


图 3 空泡敞开阶段

Fig. 3 The open phase of the cavity

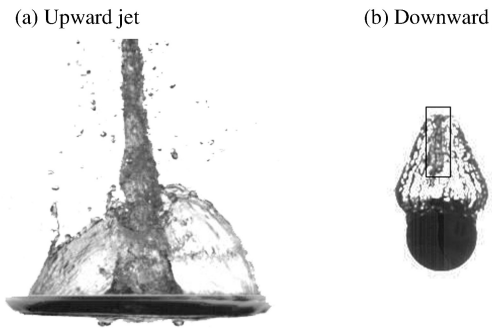


图 4 空泡溃灭高速射流

Fig. 4 High-speed jet flow during the collapse phase of the cavity

2.2 入水速度对入水空泡流动的影响

2.2.1 空泡形态分析

图 5 给出了同一标准台球从不同的高度自由落体运动入水过程的流动现象。实验中,球体表面由同样的材料擦拭,并采取热风烘干的方式进行表面干燥处理,之后在空气中放置 3~5 min,以保证每次实验时球体以相同的表面干燥度及温度自由入水。同时,针对同一个入水高度,开展多次实验,有效地排除了未知影响因素对入水流动的影响。

从图 5 可以看出:球体以 5.1 m/s 入水时产生了清晰的透明喷溅及入水空泡,喷溅和空泡形态均具有良好的对称性;但球体以约 2.0 m/s 的速度入水时并没有产生喷溅现象,而是激起一层透明的水层附着在球体表面,向上运动直到将球体的上半部分包裹,随着球体的继续下降,这一透明水层在球体正上方汇合并形成一股高速射流,实验测得此射流的速度远高于球体下落的速度。

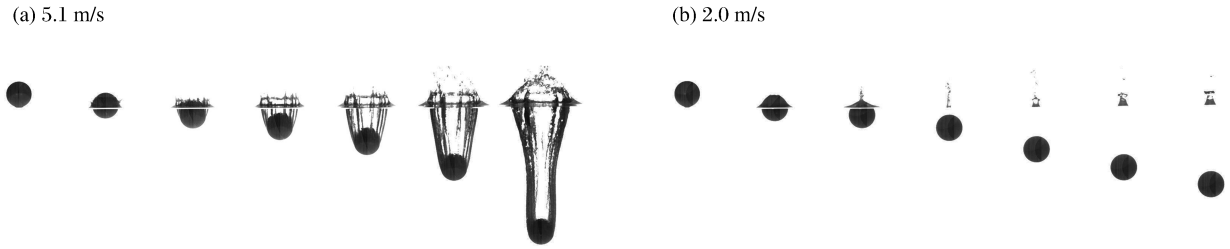


图 5 不同入水速度条件下球体垂直入水空泡的发展过程

Fig. 5 Development of vertical water-entry cavities of spheres with different entry velocities

2.2.2 运动参数分析

通过高速相机的拍摄帧数和球体在入水过程中相对自由液面的位置不难得出球体的位移曲线,对该曲线进行五阶多项式拟合[18],并对拟合后的曲线取一阶、二阶导数即可得到球体下落的速度 $v(t)$ 和加速度曲线 $a(t)$。球体入水的阻力因数为:

$$C_{\mathrm{D}}(t)=\frac{F(t)}{\frac{1}{2}\rho v^{2}(t)A}$$

式中:$F(t)=-ma(t)+mg$,为球体入水过程受到的总阻力;球体质量 $m=0.17$ kg;球体的截面积 $A=$

$\pi d^2/4$，$d=0.057$ m，为球体的直径；水的密度 $\rho=1$ t/m^3；重力加速度 $g=9.8$ m/s^2。

图 6 给出了 2 种工况下球体相对自由液面的位移 D、速度、加速度及阻力因数曲线，以竖直向下为位移、速度和加速度的正方向。从图 6(a)可以看出，在入水速度较高的条件下，球体相对自由液面的位移具有较强的非线性特征。由速度和加速度的变化曲线可以看出，球体在入水前做匀加速运动，撞击自由液面后速度呈降低趋势，且在入水速度较高的条件下球体的反向加速度值更大，速度下降更快。图 6(d)给出了 2 种情况下球体入水过程中阻力因数的变化曲线，可以看出，在速度较低、未产生空泡时，球体的阻力因数在入水后呈现出先降低、后增大的趋势，而在速度较高、形成空泡时，阻力因数呈现出先增大、后降低、再增大的趋势，并且在空泡深闭合附近有一个明显的波动。此外，图中曲线在入水瞬间有一定的不连续性，且自由液面上的加速度值也与当地加速度值有一定的差异。一方面这可能是由于 5 000 s^{-1}的拍摄速度不足以准确地捕捉球体撞击水面阶段的数据信息，另一方面可能是因为在对实验图像进行数据处理的过程中由于球体边界的模糊性产生的系统误差。

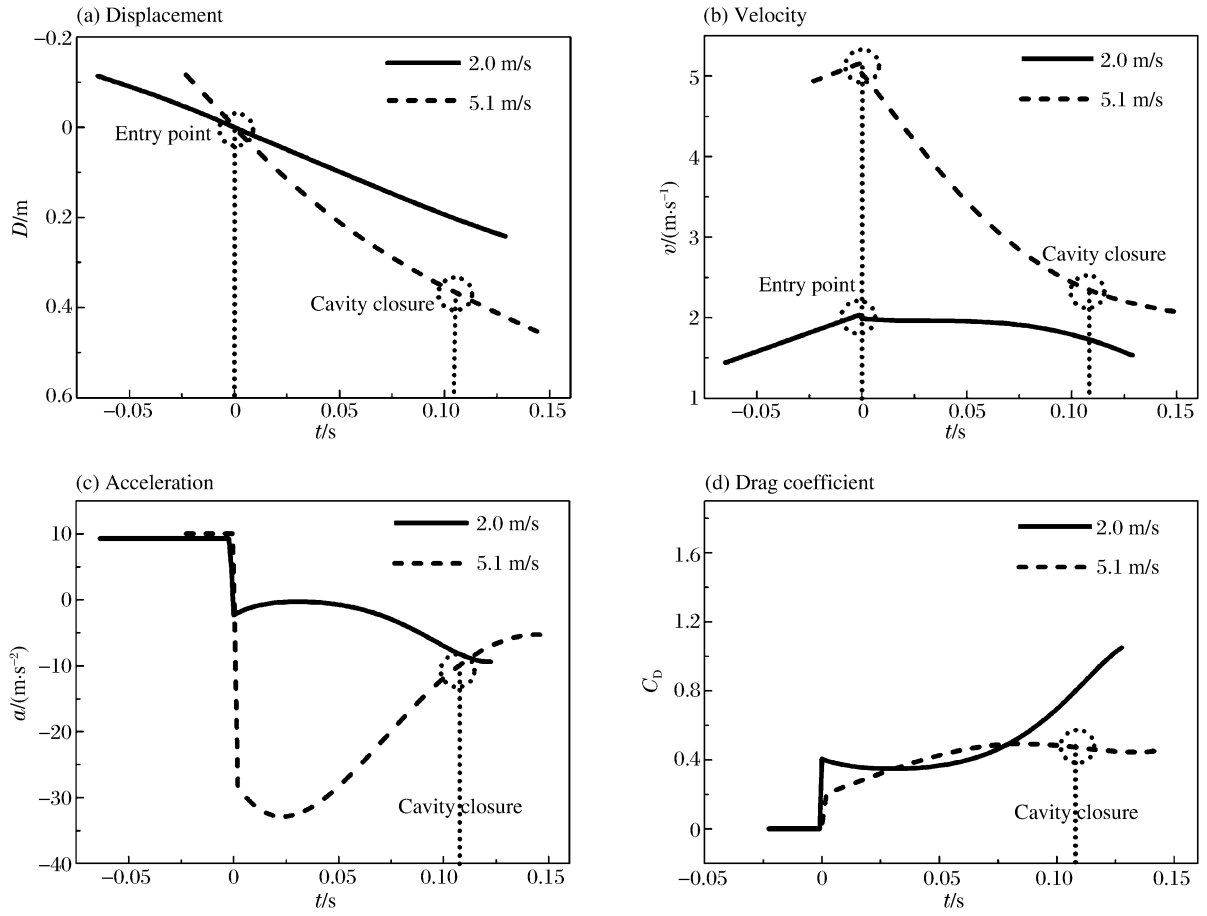


图 6　入水速度不同的球体垂直入水的运动参数和阻力因数

Fig. 6　Motion parameters for spheres in vertical water entry with different entry velocities as well as drag coefficients

从不同速度的球体入水的实验结果可以看出，在入水速度较低的条件下，垂直初始入水速度对入水空泡的形成有很大的影响，当入水速度降低到一定值时，将不会产生入水空泡。

2.3　表面沾湿状态对入水空泡流动的影响

2.3.1　空泡形态分析

在不同的表面沾湿状态下，球体入水的空泡流场特性也是不同的。图 7 给出了在表面干燥和表面沾湿 2 种状态下标准台球入水时附近流场的演化过程，2 种状态下台球从同一高度自由下落，入水速度均约 3.3 m/s。实验前对球体进行表面烘干等干燥处理，图 7(b)为表面沾湿球体的入水过程，实验前将球体在水中浸泡，拿出后在空气中静置 1 min，使球体表面均匀地覆盖一层薄薄的水层。

由图 7 可以看到,表面干燥的球体入水时形成了明显的喷溅和入水空泡,随着入水深度的增加,空泡逐渐发展并历经扩张、收缩以及溃灭整个过程。表面沾湿的球体入水后没有形成喷溅,而是激起一层薄而透明的水膜,沿着沾湿球体的表面向球体顶部运动并汇合为一点,形成向上的一股高速射流。实验表明,表面状况不同的标准台球以相同的速度入水时,球体附近的流场特性是完全不同的,表面沾湿会抑制入水空泡的形成。

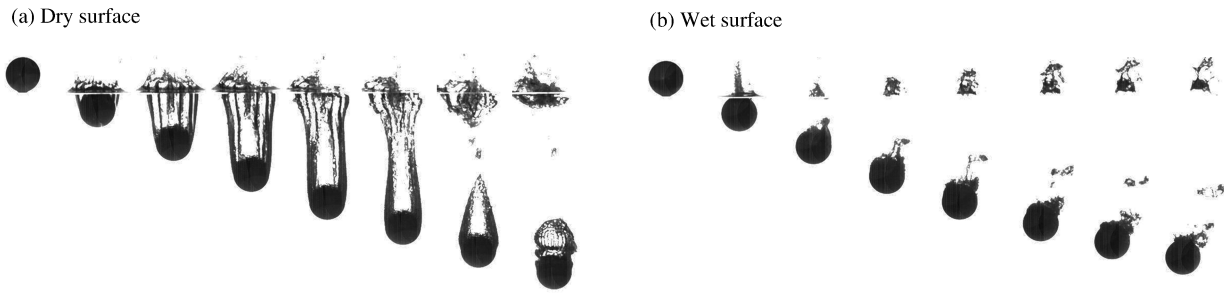


图 7 表面沾湿状态不同的球体入水空泡的演化

Fig. 7 Development of vertical water-entry cavities of spheres with different wetting surfaces

2.3.2 运动参数分析

图 8 给出了表面状况不同的 2 种球体入水运动参数及阻力因数随时间的变化规律。

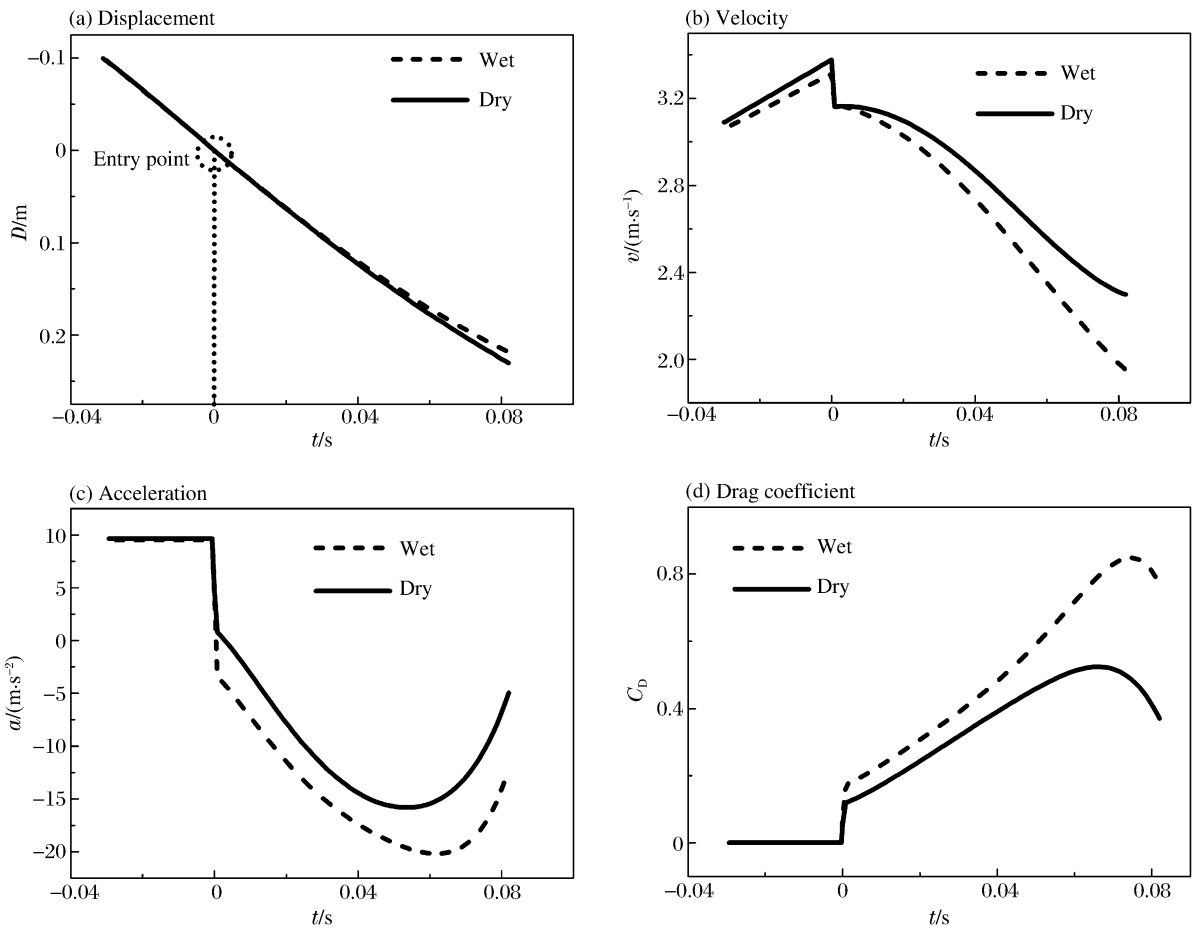


图 8 表面沾湿状态不同的球体入水的运动参数和阻力因数

Fig. 8 Motion parameters for spheres in vertical water entry with different wetting surfaces as well as drag coefficients

从图 8(a)位移曲线可以看出，入水后在同一时刻，表面沾湿球体在竖直方向的位移明显小于表面干燥球体，且两者位移之间的差随着入水深度的增加而增大。图 8(b)、图 8(c)和图 8(d)分别给出了 2 种状态下球体的速度、加速度和阻力因数的变化曲线。可以看出，2 种状态下球体的速度和加速度的变化趋势相同，但表面沾湿时球体在水下的反向加速度较大，其速度衰减也较表面干燥球体的快。

进一步分析图 8(d)阻力因数可以看出，表面沾湿时，球体在入水过程中的阻力因数更大。因此，在相同的入水速度下，表面沾湿状态下的球体入水受到的黏性阻力较表面干燥时更大。

通过以上对表面干燥和表面沾湿球体垂直入水的对照实验研究得知，在本文实验的初始入水速度下，表面沾湿状态对入水空泡的生成具有明显的影响，进一步影响球体入水后所受到的流体作用力，最终使得球体入水后运动参数和阻力因数的变化规律均表现出一定的差异。

3　结　论

对球体垂直入水问题开展了实验研究，分析了球体入水空泡的形成、发展、闭合及溃灭过程。研究表明，球体垂直入水自由液面的喷溅受冲击力、重力、表面张力等多个因素的影响；空泡在深闭合时会产生 2 股方向相反的高速射流，射流速度远高于球体在同一时刻的运动速度。

分析了初始入水速度和表面沾湿状态对球体垂直入水空泡流动的影响，结果表明：初始入水速度对入水空泡的形成有很大的影响，初始入水速度小于一定值时球体入水将不能产生空泡；球体在水下的运动参数具有较强的非线性特性，在速度较高、入水空泡深闭合的条件下，球体的运动参数曲线和阻力因数曲线具有明显的波动。在本文实验中的初始入水速度条件下，球体表面沾湿对入水空泡的形成具有抑制作用；在表面沾湿条件下，球体在入水过程中速度衰减更快，阻力因数更大。

参考文献：

[1] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography: Paper II [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: Series A, 1900,194:175-200.

[2] Gilbarg D, Anderson R A. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water[J]. Journal of Applied Physics, 1948,9(2):127-139

[3] Richardson E G. The impact of a solid on a liquid surface[J]. Proceedings of the Physical Society of London, 1948, 61(4):352-366.

[4] May A, Woodhull J C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically[J]. Journal of Applied Physics, 1948,19(12):1109-1121.

[5] May A, Woodhull J C. The virtual mass of a sphere entering water vertically[J]. Journal of Applied Physics, 1950,21(12):1285-1289.

[6] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity[J]. Journal of Applied Physics, 1951,22 (10):1219-1222.

[7] May A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles[R]. ADA020429, 1975.

[8] May A. Vertical entry of missiles into water[J]. Journal of Applied Physics, 1952,23(12):1362-1372.

[9] Miloh T. Wave slam on a sphere penetrating a free surface[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1981,15(3): 221-240.

[10] Miloh T. On the oblique water-entry problem of a rigid sphere[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1991,25 (1):77-92.

[11] Miloh T. On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry[J]. Applied Ocean Research, 1991,13(1):43-48.

[12] Truscott T T, Techet A H. Water entry of spinning spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009,625:135-165.

[13] Truscott T T, Techet A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres [J]. Physics of Fluids, 2009,21(12):1703.

[14] 顾建农，张志宏，范武杰. 旋转弹丸入水侵彻规律[J]. 爆炸与冲击，2005,25(4):341-349.

Gu Jian-nong, Zhang Zhi-hong, Fan Wu-jie. Experimental study on the penetration law of a rotating pellet entering water[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):341-349.

[15] 李晓杰,姜力,闫鸿浩,等.低侵彻手枪弹入水侵彻性能数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2007,27(4):319-324.
Li Xiao-jie, Jiang Li, Yan Hong-hao, et al. Numerical simulation on low inbreaking handgun projectile drilling through the water[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):319-324.

[16] 张伟,郭子涛,肖新科,等.弹体高速入水特性实验研究[J].爆炸与冲击,2011,31(6):579-584.
Zhang Wei, Guo Zi-tao, Xiao Xin-ke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):579-584.

[17] 何春涛,王聪,何乾坤,等.圆柱体低速入水空泡试验研究[J].物理学报,2012,61(13):4701.
He Chun-tao, Wang Cong, He Qian-kun, et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(13):4701.

[18] Truscott T T. Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009.

Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere*

Ma Qing-peng[1], He Chun-tao[2], Wang Cong[1],
Wei Ying-jie[1], Lu Zhong-lei[1], Sun Jian[1]
(1. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*;
2. *Beijing Mechanical Equipment Institute, Beijing* 100854, *China*)

Abstract: Experimental investigations and analysis were carried out on the vertical water-entry of the spheres. The development process of the cavities induced by the vertical water-entry of the spheres was discussed including the formation, open, closure and collapse of the cavities. The influences of the water-entry velocities and surface conditions of the spheres on the cavities were experimentally obtained. And the displacements, velocities, accelerations and drag coefficients of the spheres during the water entry were analyzed. The investigated results show that the motion parameters of the spheres present highly nonlinear characteristics. And there are obvious fluctuations of the motion parameters and the drag coefficients during the closed-cavity phase if the water-entry velocities are high.

Key words: fluid mechanics; water-entry cavity; vertical water-entry; sphere; motion parameter

* Received 12 September 2012; Revised 24 December 2012
Corresponding author: Ma Qing-peng, qingpengma@gmail.com

(责任编辑 张凌云)