

航行体垂直入水开式空泡精细流场研究*

王宇飞^{1,2} 黄荐^{1,2} 叶秉晟^{1,2} 王一伟^{1,2} 黄晨光^{1,2}

(1 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 100109)

(2 中国科学院大学工程科学学院, 100049)

摘要 航行体入水流场涉及到自由面大变形、非线性流动以及流固耦合等难题, 是具有重要工程科学价值的前沿基础问题。本文在开源计算流体力学软件 OpenFOAM 的基础上二次开发, 构建了可压缩三相含空化相变求解器, 用于开展流场特性数值模拟研究。在典型工况下, 发现水平液面空泡开口处存在涡环, 进一步分析了气体侵入以及涡环对周围流场的影响, 结果表明, 涡旋作用处存在局部低压区, 空泡形态变化后气体无法有效侵入空泡内部, 导致空泡内压力降低, 最终发生表面闭合现象。

关键词: 高速入水; OpenFOAM; 涡旋结构; 大涡模拟; 表面闭合;

一、引言

从广泛意义上来讲, 入水是指固体以相对速度穿越自由表面进入液体的过程, 自然界中就有许多例子, 比如青蛙在水面跳跃, 鸟类从空中俯冲捕捉水下猎物和打水漂等。入水在工程领域也有着广泛的应用, 例如船舶航行时的俯仰运动, 海洋平台和海岸结构物所受到海浪冲击, 水上飞机及航天器水上降落都是典型的实例。大量关于入水的研究正是围绕冲击载荷^[1], 水下运动规律^[2]和自由液面形态三个主题, 将结构物和液体流场作为主要的研究对象进行的。遗憾的是, 就我们所知, 还没有研究涉及入水产生半开式空泡内部流场的流动情况。

二、实验设备

航行体高速入水实验系统主要包括可移动自由发射装置、密封水箱、气压调节装置和发射触发器四个部分。密封水箱上部安装有四角支架, 水平导轨固定在支架上, 移动发射器安装在支架上, 发射器使用高压气瓶作为动力源, 由高压电磁阀控制高压气, 将航行体试件弹射出管, 速度最高可达 60m/s, 发射管可在 90° 范围内调节。整个入水过程由高速相机记录, 其拍摄时的曝光频率为每秒 20000 帧, 实验温度 20℃, 实验所用试件是长为 90mm, 直径为 9mm 的铝制锥头圆柱。

三、数值模拟方法

在航行体入水问题中, 考虑低压区可能出现的空化相变效应, 流场中包含水、水蒸气与不可凝结空气介质, 流场内任意流体微团均由三项介质以不同的比例混合而成, 本文采用 VOF 方法求解多相流动及模拟交界面变化。在湍流中, 大涡结构是各向异性的, 而较小的则是各向同性的。大涡模拟方法首先过滤不同尺度的涡, 进而对小尺度的涡建立亚格子模型。分辨大小尺度的涡是通过滤波方法实现的。当局部压强小于饱和蒸气压时, 液体蒸发为水蒸气, 当局部压强大于饱和蒸气压时, 水蒸气凝结为液体, 蒸发率和凝结率可由 Kunz 模型描述。

计算域划分了结构化网格, 并对边界层网格进行了加密, 计算使用开源流体力学软

* 基金项目: 国家自然科学基金(11772340&11672315) 中科院青年创新提升促进会(2015015)

件 OpenFOAM 完成，时间上采用一阶隐式离散，空间上采用高斯线性插值。

四、 结果与讨论

从航行体周围的流线分布可以看出，液体域内，由于入水产生的包裹航行体的空泡，流体平滑地向航行体两侧流去，因此空泡的形成有助于减小水下运动的阻力；空气域内，入水初期图中 0.5ms-1.0ms 时，自由液面上方有明显的涡环出现，一部分空气随着涡环的运动进入空泡内部，涡旋与空泡壁的相对位置也随着时间发生变化，如图 1 所示。

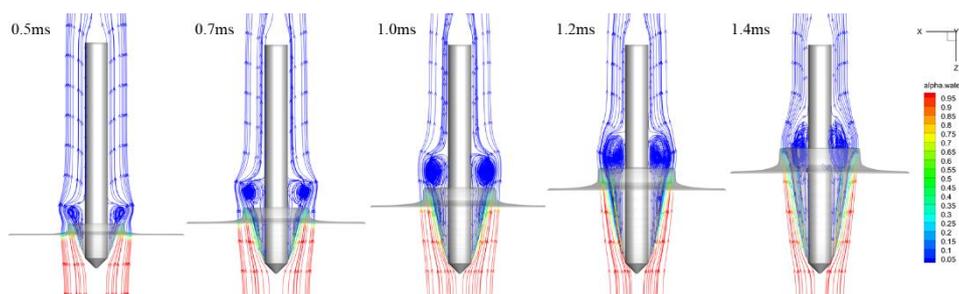


图1 不同时刻航行体周围的流线

五、 结论

本文针对航行体入水过程中流场特性展开了数值模拟研究，采用了大涡模拟方法并考虑了空化和流体可压缩性的影响，计算结果与实验吻合良好。我们发现水平液面附近有明显的涡环产生，首先对航行体周围的流线进行了分析，在刚入水时，由于涡环的运动，有一部分气体侵入空泡内部，随着空泡形态和自由液面的变化，气体侵入开始逐渐消失，空泡内部流动由稳定到混乱，涡旋和空泡的相对位置不断改变，诱导空泡向中间聚拢。随后对流场的压力分布展开了分析，涡环作用处的压力明显低于空泡内部和外界大气压，在入水一段时间后，气体难以侵入空泡内部，而随着航行体的深入，空泡体积又不断增加，因此使得空泡内压力持续降低，所以说，是涡旋运动及其产生的连锁效应导致了空泡表面闭合。在此基础上本文又引入了涡识别方法，对流场中的涡结构进行了分辨与研究。最后，将入水产生水平液面附近的涡环和兰金涡进行了对比，并认为它们具有一定相似性。

参 考 文 献

- 1 B. Speirs, Nathan & Belden, Jesse & Pan, Zhao & Holekamp, Sean & Badlissi, George & Jones, Matthew & T. Truscott, Tadd. (2018). Reducing water entry impact forces.
- 2 G. Bodily, Kyle & J. Carlson, Stephen & Truscott, Tadd. (2014). The water entry of slender axisymmetric bodies. *Physics of Fluids*. 26. 072108. 10.1063/1.4890832.