

基于变体积力的跨水气界面多相流及流固耦合问题实验方法研究

辛万青¹, 尤天庆²

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 航行体跨水气界面过程物理现象复杂并且多种力学效应耦合, 相关研究往往需要利用缩比模型实验开展。已有缩比模型实验体积力保持不变, 主要考虑弗劳德数和空化数相似, 难以分析其他相似参数影响。利用离心机形成可变体积力环境, 增加了实验可控参数, 提高了实验模拟参数的完备性。通过流动和结构形变理论分析, 形成了基于变体积力的跨水气界面多相流及流固耦合问题研究方案, 可在考虑弗劳德数和空化数影响条件下, 进一步考察雷诺数或结构形变的影响。针对上述研究方案, 分析了缩比模型实验模拟条件并开展了仿真计算, 验证了所提出实验方案的可行性, 为跨介质问题研究丰富了探索途径。

关键词: 离心机; 跨界面; 多相流; 流固耦合

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0052-09

Research on Experimental Method of Multiphase Flow and Fluid Structure Interaction Across Water-Air Interface Based on Variable Body Force

XIN Wanqing¹, YOU Tianqing²

(1. China Academy of launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The physical phenomenon of the vehicle crossing water-air interface is extremely complicated, which involves multiple mechanical coupling effects. The related studies are always relied on the scaled model experiments. The body force of the existing scaled model experiment remains unchanged, the Froude and cavitation non-dimensional numbers are considered to be simulated. However, other impact factors can hardly investigated. The control variables are extended by introducing adjustable body force environment in centrifuge, which promotes the multi-parameter simulation capability. Based on the analysis of fluid mechanism and structural deformation theory, a research plan for multiphase flow across the water-air interface and fluid structure coupling based on variable body force is formed. The effect of Reynolds number or structural deformation can be investigated under the condition of considering the influence of Froude and cavitation numbers. According to the above research plan, the simulation conditions of the scale model experiment were analyzed, and the calculation was carried out to verify the practicability of proposed experiment plan, which enriched the exploration ways for the study of cross-media problems.

收稿日期: 2022-12-13; 修订日期: 2023-03-03

作者简介: 辛万青 (1965-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体技术。E-mail: yhzts@163.com

Key words: Centrifuge; Water air interface crossing; Multiphase flow; Fluid structure interaction

0 引言

航行体跨水气界面运动过程中,伴随着多相流瞬态演化,无论是航行体刚体运动还是结构形变,均受多种因素影响,且变化规律复杂^[1]。该过程不仅涉及多相介质、多尺度的复杂瞬变流动,而且当结构形变足够明显,影响多相流体动力特性时,流固耦合特性也将不可忽略。瞬态多相流演化和流固耦合响应,是跨水气界面航行体研发的重点关注问题。

空泡多相流动状态与运动参数、环境压力和水动构型有关,同时也受空泡末端回射流、边界层作用等内在流动机制影响^[2-3],在多种因素作用下空泡流态变化丰富^[4]。空泡形态上分为透明玻璃状区域和非定常云雾泡沫状区域,在非稳定的泡沫状区域,多相介质掺混剧烈,流场结构复杂^[5]。航行体跨水气界面过程伴随着环境压力和运动速度动态变化,即包含大尺度空泡整体演化,也有界面失稳空泡脱落等局部流动现象,实验研究需要考虑弗劳德数 Fr 、空化数 σ 和雷诺数 Re 等相似参数。目前跨水气界面多相流动模型实验研究,重点关注空泡宏观动态演化过程和模型运动特征^[6-7],主要考虑弗劳德数和空化数影响,雷诺数受试验条件限制,不能有效模拟,对空泡界面失稳空泡脱落等不稳定现象模拟不足。空泡发展稳定性研究,大多在定常水洞中开展^[8],与真实跨介质过程有一定区别。

航行体高速跨水气界面时,流体力量值高且强非线性,对结构产生强烈冲击。当结构弹塑性变形影响流体动力外形时,将产生明显的流固耦合效应。跨水气界面航行体结构动响应研究,主要有数值仿真和实验两方面。数值仿真计算包括任意拉格朗日欧拉计算方法^[9]以及流体和结构耦合迭代计算^[10]等,可直接在计算过程中考虑流固耦合效应影响,但数值算法研究有赖实验数据支撑。跨水气界面结构动响应实验研究大多见于高速入水缓冲降载,关注缓冲吸能结构动态性能^[11-12],主要分析入水结构加速度、应力和应变参数变化^[13]。在结构变形对多相流动演化影响的实验研究方面,分析了物面弹性变形对跨介质空泡演化的影响^[14-15]。考虑结构弹塑性变形和破坏影响的入水实验,涉及流固耦合的相似模拟,对

实验技术要求较高,流动和结构同时相似的模型实验研究相对较少。

用小尺度模型实验模拟原型受力状态,进而研究流体运动、刚体运动或结构变形,研究关键在于识别现象中包含的各种力状态^[16]。对于模型跨水气界面运动过程,受力主要包括重力、黏性力、表面张力以及结构弹性或塑性力。已有跨水气界面多相流缩比模型实验中,体积力在原型和模型中均保持不变,实验可控参数包括特征速度和环境压力,主要考虑弗劳德数和空泡数相似,而忽略了雷诺数和韦伯数的影响。由于结构材料塑性本构关系多存在尺度效应,缩比关系研究目前仅限于结构破坏问题^[17],考虑流体和结构形变相似的实验目前研究还鲜有涉及。在离心机实验条件下,可实现体积力的变化调节,相对原有实验条件,增加了新的实验可控参数,可在一定条件下考察雷诺数、韦伯数或物面形变的影响。

本文分别针对航行体跨水气界面多相流动和流固耦合问题,基于流动和结构弹塑性形变控制方程,通过参数量纲归一化分析,获得了基于变体积力环境的缩比实验模拟条件,形成了跨水气界面多相流及流固耦合问题实验研究方案。针对形成的缩比模型实验研究方案,开展了多相流和流固耦合计算,分析了变体积力环境跨水气界面流动模拟相似性、雷诺数影响以及结构弹塑性本构关系影响,初步验证了离心机内跨水气界面多相流动和流固耦合问题的可行性。

1 跨水气界面多相流研究

跨水气界面多相流动是压差力、重力和黏性力多种因素的耦合作用结果。为明确各种力学效应对不同尺度流动现象的影响,支撑大尺度流动现象的分析和设计,有必要对跨水气界面多相流动进行针对的影响因素研究。

1.1 流动控制方程的量纲归一化分析

跨水气界面多相流动中水气密度差异巨大,航行体运动所引起的水介质运动在多数流动状态下占主导作用。以水介质流动为关注点,进行流动影响因素分析,其流体质点运动动量方程如式(1)所示。

$$\rho_l \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho_l g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

式中, x 为位置坐标, t 为时间, v 为流场质点速度, p 为压力, ρ_l 为水密度, g 为体积力系数, μ 为水黏度。以长度 L 、速度 V 、水面压力 P_a 、水的饱和蒸汽压 P_v 和当地重力加速度 G 等特征量, 对变量进行量纲归一化。

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{Vt}{L}, \bar{x} = \frac{x}{L}, \bar{v} = \frac{v}{V}, \\ \bar{p} &= \frac{p - P_v}{P_a - P_v}, \bar{g} = \frac{g}{G} \end{aligned} \quad (2)$$

流体动量方程量纲归一化如式 (3) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial \bar{t}} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial \bar{x}_j} &= \frac{GL}{V^2} \bar{g}_i - \frac{P_a - P_v}{\rho_l V^2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_i} + \\ &\frac{\mu}{\rho_l VL} \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial \bar{x}_j \partial \bar{x}_j} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 方程右侧, 体积力、压力梯度和黏性这 3 项前的无量纲系数 V/\sqrt{GL} , $(P_a - P_v)/\rho_l V^2$ 和 $\rho_l VL/\mu$ 是保证不同尺度流动相似参数, 即 Fr 、 σ 和 Re , 分别表征体积力、压差力、黏性力与惯性力的比值。

采用缩比模型对跨介质流场演化过程进行模拟时, 需尽量保证上述相似参数一致。而在实验过程中, 还需结合实验技术手段和实验关注的流动现象, 综合考虑实验相似参数模拟状态。例如, 现有实验条件下, 在模型几何尺寸 L 减小条件下, 通过减小速度 V 和水面压力 P_a , 使原型和模型的 $Fr = V/\sqrt{GL}$ 和 $\sigma = (P_a - P_v)/\rho_l V^2$ 相似, 在体积力、流体密度和黏性保持不变的情况下, 模型和原型的 $Re = \rho_l VL/\mu$ 会产生差异。缩比模型实验几何比尺 $L_p/L_m = \lambda$ 条件下, 雷诺数之比 $Re_p/Re_m = \lambda^{1.5}$ 。其中下标 p 表示原型, m 表示模型。

目前大型航行体跨水气界面运动过程中, 原型与模型 Re 差异较大。上述 Re 差异对缩比模型实验空泡多相流动整体状态影响相对较小, 但会使缩比模型和原型的局部流态不同, 存在尺度效应。例如, 已有不同尺度通气空泡水洞试验中, 小尺度试验空泡水气界面呈现透明玻璃装流态, 而大尺度试验空泡呈现云状空泡脱落特征, 如图 1 所示。

1.2 跨水气界面多相流 Re 影响实验研究方案

跨水气界面多相流缩比模型实验, 一般通过改变水面压力和调节模型特征速度, 保证 σ 和 Fr 相似。通过离心机改变缩比模型实验环境的体积力 $G_m = nG_p$, 增加了实验可控参数, 提升了实验

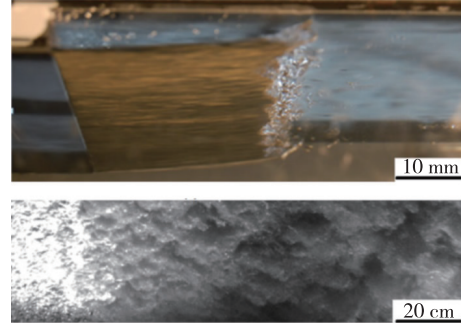


图 1 不同尺度通气空泡模型实验 ($Fr = 0.6$)^[18]

Fig. 1 Model experiment of ventilated cavity with different scale ($Fr = 0.6$)^[18]

模拟参数的完备性, 拓展了实验控制参数设置的灵活性, 为研究更多影响因素创造了有利条件, 如表 1 所示。

表 1 不同体积力和水面压力环境的实验模拟条件

Tab. 1 Experiment condition with different body force and free surface pressure

	$G_m = G_p$	$V_m = V_p/\sqrt{\lambda}$
体积力恒定	$L_m = L_p/\lambda$	$t_m = t_p/\sqrt{\lambda}$
变水面压力	$P_{am} = P_{ap}/\lambda + (1-1/\lambda)P_v$	
	$Re_m = Re_p/\lambda^{1.5}$	
	$G_m = nG_p$	$V_m = V_p$
变体积力	$L_m = L_p/\lambda$	$t_m = t_p/\lambda$
水面压力恒定	$n = \lambda$	$P_{am} = P_{ap}$
	$Re_m = Re_p/\lambda$	
	$G_m = nG_p$	$V_m = V_p/\sqrt{\lambda/n}$
变体积力	$L_m = L_p/\lambda$	$t_m = t_p/\sqrt{n\lambda}$
变水面压力	$P_{am} = nP_{ap}/\lambda + (1-n/\lambda)P_v$	
	$Re_m = Re_p n^{0.5}/\lambda^{1.5}$	

变体积力环境, 可替代水面减压环境, 保证宏观流动相似条件, 简化试验设施要求的同时, 使模型和原型特征速度和压力一致, 为流固耦合研究提供了条件。表 1 分析也表明, 在离心机内通过可变压力水箱开展跨水气界面多相流动缩比实验, 可在改变水面压力的同时, 调节模型实验环境的体积力, 保证 Fr 和 σ 一致条件下, 实现 Re 在一定范围内可控变化。当 $n = \lambda^3$ 时, 原型与模型雷诺数一致。

1.3 典型工况的数值模拟

针对以上变体积力环境中进行的缩比模型实验, 以入水多相流演化为例, 进行了数值模拟仿真计算。计算基于雷诺平均 N-S 方程, 在动量方

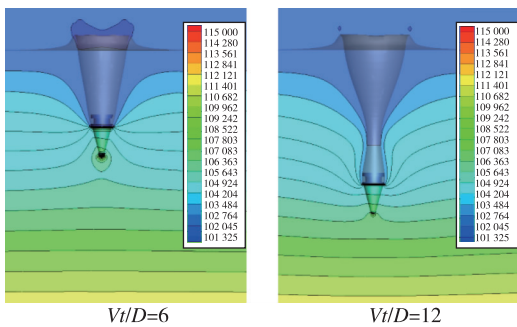
程中增加了科氏力影响。同时在模型刚体运动方程中，也考虑了科氏力的影响。

为表明离心机内跨水气界面流动相似模拟，可覆盖常规体积力条件的水面减压实验，计算在水面压力不变条件下，不同尺度模型和不同体积力条件的入水过程。计算的锥柱组合体尺寸和入水条件见表 2。其中 D 为模型直径， D_0 为原型直径。锥柱组合体入水过程经历了撞击水面、形成入水开空泡以及空泡闭合等过程，其中开空泡形态以及空泡闭合，是入水空泡多相流的主要流动特征。数值计算获得的不同尺度模型入水典型时刻压力云图和空泡形态见图 2。计算表明在相同入水时刻 Vt/D ，不同尺度流场压力云图较为一致，同时开空泡形态较为相似，空泡发展均处于颈缩闭合的初期，不同尺度入水实验景象相似性较好。同时数值计算也表明，在实验体积力变化范围条件下，离心机转速相对较低，科氏力对空泡多相流场对称性影响相对有限。

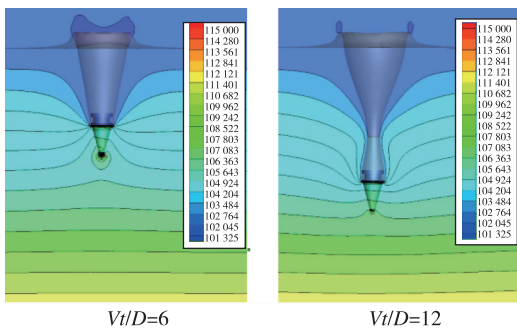
表 2 变体积力水面压力恒定入水计算条件

Tab. 2 Numerical calculation condition with different body force while surface pressure unchanged

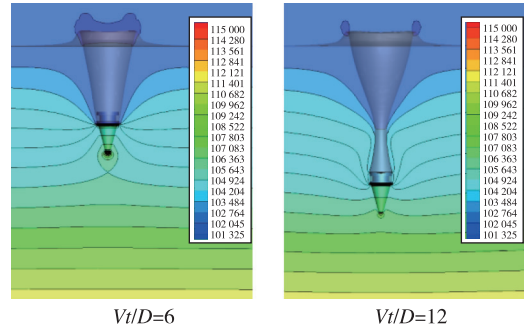
D	n	σ	Fr	Re
$0.25D_0$	4	3.06	9.03	1.59×10^5
$0.50D_0$	2	3.06	9.03	3.18×10^5
D_0	1	3.06	9.03	6.37×10^5



(a) $D = 0.25D_0$



(b) $D = 0.50D_0$

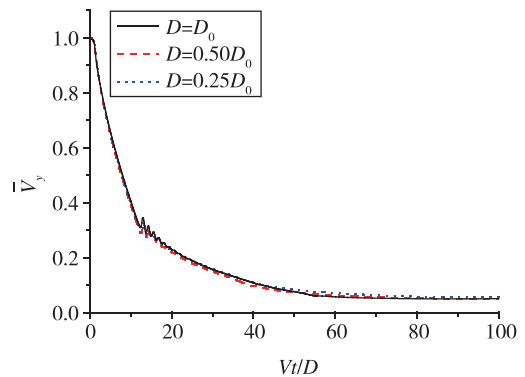


(c) $D = D_0$

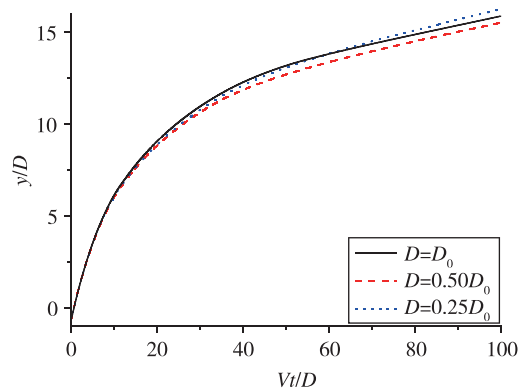
图 2 不同体积力条件下模型入水压力云图

Fig. 2 Contour of pressure of water entry with different body force

提取计算模型质心垂向运动和俯仰运动参数，如图 3 所示。不同尺度模型垂向速度及运动轨迹一致性较好，表明已有缩比关系可以较好地模拟入水垂直方向的运动特征，包括开空泡闭合所引起的轴向速度波动 ($Vt/D = 14$ 时段附近)。计算工况的 Re 差异相对较小，垂向运动速度在空泡闭合过程的变化仅有细微差别。受科氏力影响，离心机内模型俯仰角速度，较常规重力条件波动更为剧烈。



(a) 垂向速度



(b) 垂向位移

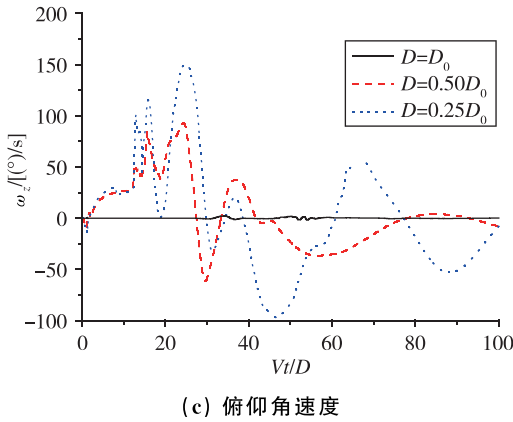


图 3 不同体积力环境的入水模型刚体运动
Fig. 3 Rigid motion of water entry model with different body force

为模拟 Re 数的大范围变化, 可在离心机内进行密封加减压水箱入水实验。针对此试验状态, 开展模型尺度 $D = 0.50D_0$ 的入水流场仿真计算, 对比计算工况参见表 3。数值计算获得的典型时刻流场结构见图 4, 不同尺度模型入水开空泡形态较为接近, 压力云图一致性也较好。高过载条件下离心机转速较高, 产生了较显著的科氏力影响, 模型存在倾斜, 流场对称性产生改变。

表 3 变体积力且变水面压力入水计算条件
Tab. 3 Numerical calculation condition with different body force and surface pressure

P_a	n	σ	Fr	Re
$3.14P_0$	100.5	1	4	1.0×10^6
$0.07P_0$	1.0	1	4	1.0×10^5

提取变体积力加减压环境计算模型质心垂向速度和俯仰角速度, 如图 5 所示。相比单纯改变体积力环境的缩比模型实验, 加减压状态试验, 在相同 Fr 和 σ 条件下, 使 Re 差异显著, 入水空泡闭合后的湍流阻力存在差异, 从而使入水速度变化不一致。以上计算结果表明, 离心机内的跨水气界面模型实验, 可在保证 Fr 和 σ 动态相似条件下, 研究 Re 数变化的影响。

以上理论分析和仿真计算表明, 在离心机形成的变体积力条件, 开展开放水箱跨介质实验, 可在原型和模型特征速度相等条件下, 实现空泡形态的有效模拟。在离心机形成的变体积力条件, 开展密封加减压水箱跨介质实验, 可通过改变速度、水面压力和重力加速度, 实现对 Fr 、 σ 和 Re

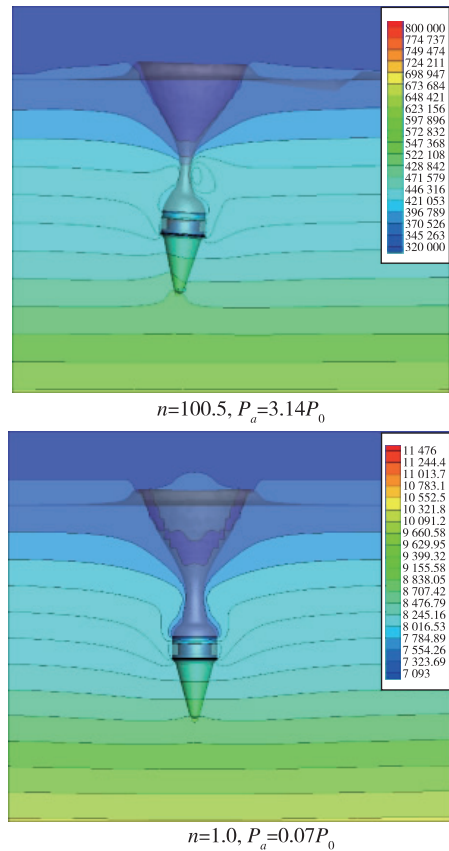
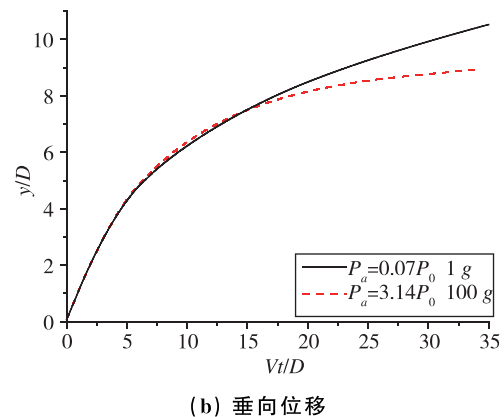
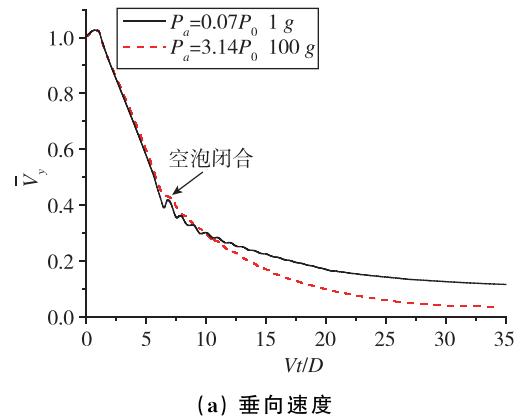


图 4 不同体积力和水面压力环境下模型入水压力云图 ($Vt/D = 6.3$)

Fig. 4 Contour of pressure of water entry with different body force and surface pressure ($Vt/D = 6.3$)



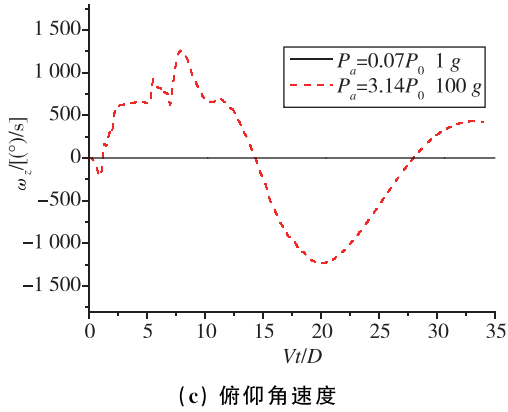


图 5 变体积力变水面压力环境下入水模型刚体运动

Fig. 5 Rigid motion of water entry with different body force and surface pressure

的单独调节, 有望在已有减压水池试验基础上, 进一步分析 Re 等其他相似参数变化的影响。但在离心机内进行实验, 流体质点运动以及模型的运动, 将不可避免地引入科氏力的影响。离心机转速较高条件下, 必要时可采用约束模型实验以保证俯仰运动的一致性, 同时流动现象分析应注意区分流动本身流动现象以及科氏力引起的流动现象。

2 跨水气界面流固耦合研究

航行体入水或出水过程中, 一般情况下航行体结构的弹性振动幅度相对较小, 对流动物面的影响可以忽略。但随着入水速度提高, 航行体承受的入水冲击力显著增大, 采用结构变形吸能的方法减小入水冲击, 是入水降载的主要技术途径之一。这种在入水过程中, 存在明显的流体动力外形改变, 同时外形的改变受入水冲击力和缓冲吸能结构形变影响, 是明显的多相流和结构弹塑性变形耦合问题。

2.1 固体形变控制方程的无量纲分析

流体部分的无量纲分析与 1.1 节一致, 固体形变控制方程为

$$\text{平衡方程 } \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho_s g_i = \rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\text{应变方程 } \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\text{本构关系 } \sigma_{ij} = F_{ij}(\epsilon_{km}), \varphi(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}) < \sigma_0 \quad (6)$$

$$\text{边界条件 } \sigma_{ij} n_j = p_i, u_i = U_i \quad (7)$$

其中, σ_{ij} 为应力, ϵ_{ij} 为应变, ρ_s 为固体密度, u_i 为固体形变位移, σ_0 为材料的屈服强度或破坏强度, n_j 为应力边界的方向向量, p_i 和 U_i 分别为边界的压力和位移分量。对上述方程变量进行无量纲化, 可得式 (4) ~ (7) 固体形变控制方程的无量纲形式。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij} - P_v}{P_a - P_v}, \bar{u}_i = \frac{u_i}{L} \quad (8)$$

$$\frac{P_a - P_v}{\rho_s V^2} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial \bar{x}_i} + \frac{LG}{V^2} g_i = \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial \bar{t}^2} \quad (9)$$

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i} \right) \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = F_{ij}(\bar{\epsilon}_{km}), \varphi(\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\epsilon}_{ij}) < \sigma_0 \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} n_j = \bar{p}_i, \bar{u}_i = \bar{U}_i \quad (12)$$

固体应力状态相似, 应保证无量纲的平衡方程 (式 9) 中的系数 $(P_a - P_v)/\rho_s V^2$ 和 LG/V^2 一致。该系数与流体控制方程中 Fr 和 σ 类似, 当实验选取相同材料时, 固体变形过程的平衡方程自动满足。

对于结构变形, 本构关系 (式 (11)) 的形式和具体系数与结构材料相关, 在大变形以及存在材料破坏条件下, 函数 F_{ij} 和 φ 均为非线性, 并且材料屈服强度或破坏强度 σ_0 是材料自身属性, 与结构尺度无关。因此, 构建考虑流固耦合影响的缩比模型实验时, 需通过材料参数或结构设计, 保证模型的受力变形关系与原型一致, 实验技术难度较大。而变体积力实验环境下, 在采用相同的材料条件时, 结构几何相似即可使结构变形与原型一致。

2.2 跨介质流固耦合影响研究实验方案

当入水结构尺寸较大时, 采用缩比模型实验, 研究入水冲击和运动特性, 可减小实验成本和周期。同时, 利用模型实验参数测量手段丰富的优势, 开展跨介质流固耦合缩比模型实验, 可细致分析结构形变和流动动态演化的相互耦合作用, 也可研究不同结构变形状态的降载缓冲效果。

针对不同跨水气界面缩比模型试验参数进行分析, 如表 4 所示。一般跨水气界面多相流实验通过改变水面压力, 使模型和原型流动相似, 但此条件下, 作用在结构和流体界面的压力减小, 模型和原型结构材料本构关系一致条件下, 结构应

变 ϵ_{ij} 不一致, 进而使结构形变不满足缩比关系。利用离心机形成变体积力环境, 可在保证 Fr 和 σ 与原型一致条件下, 即宏观流动相似条件下, 也使固体变形趋于一致。当 $n = G_m / G_p$ 与 $\lambda = L_m / L_p$ 一致情况下, $(P_a - P_v) / \rho_s V^2$ 和 LG / V^2 自动满足, 应力平衡方程相似, 速度、压力和应力量将不存在缩比关系, 当模型与原型采用相同材料条件下, 结构变形将相似。

表 4 流固耦合实验结构形变模拟条件

Tab. 4 Structure deformation simulation condition considering flow structure interaction

变体积力	$G_m = \lambda G_p$	$L_m = L_p / \lambda$
	$V_m = V_p$	$P_{am} = P_{ap}$
	$t_m = t_p / \lambda$	$(\sigma_{ij})_m = (\sigma_{ij})_p$
	$\sigma_{ij} = F_{ij}(\epsilon_{km}), \varphi(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}) < \sigma_0$ (模型与原型本构关系一致)	
	$(\epsilon_{ij})_m = (\epsilon_{ij})_p$	$(u_i)_m = (u_i)_p / \lambda$
变水面压力	$G_m = G_p$	$V_m = V_p / \sqrt{\lambda}$
	$L_m = L_p / \lambda$	$t_m = t_p / \sqrt{\lambda}$
	$P_{am} = P_{ap} / \lambda + (1 - 1/\lambda) P_v$	
	$ \sigma_{ij} n_j _m = \sigma_{ij} n_j _p / \lambda + (1 - 1/\lambda) P_v$	
	$\sigma_{ij} = F_{ij}(\epsilon_{km}), \varphi(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}) < \sigma_0$ (模型与原型本构关系一致)	
	$(\epsilon_{ij})_m \neq (\epsilon_{ij})_p$	$(u_i)_m \neq (u_i)_p / \lambda$

2.3 典型工况计算分析

为表明上述跨水气界面流固耦合问题研究方案的可行性, 基于理想锥柱组合外形进行了计算分析。在入水过程中锥体头部较高的压力将锥体逐渐压缩, 使流体动力外形改变, 如图 6 所示。在头锥外形逐渐变化过程中, 头部的阻力和附连水质量不断变化。计算中对头锥变形的结构动力学和结构本构关系进行了简化, 如图 7 所示。将模型

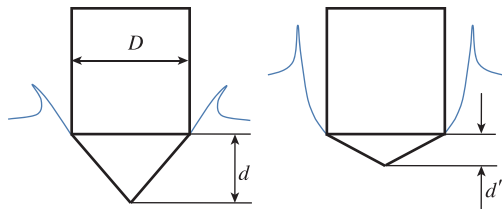


图 6 入水流固耦合计算示意图

Fig. 6 Fluid structure interaction calculation scheme of water entry

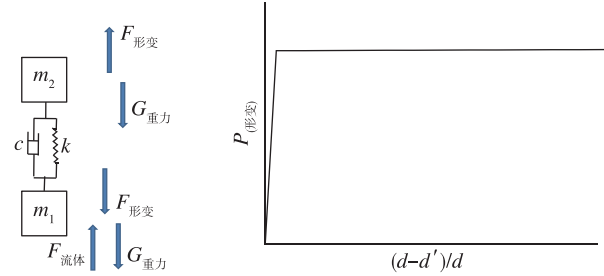


图 7 结构动力学计算模型

Fig. 7 Calculation model of structure dynamic

头锥和后部柱段简化为两自由度的集中质量点, 用两质量点连接的弹簧刚度和阻尼变化等效模型锥段变形的动力学过程。设定弹簧刚度分段线性变化, 以模拟材料弹塑性变形。

基于上述入水流固耦合计算模型, 开展了原型以及不同缩比关系的模型仿真计算, 计算中 $m_1 / m_2 = 1 \times 10^{-4}$, 计算获得的模型无量纲加速度曲线如图 8 所示。其中 $\bar{a} = a / G$, a 为计算获得的模型运动加速度。计算表明由于头锥变形缓冲, 模型入水初期 $Vt / D < 1$, 加速度明显较小。当采用减压手段使 Fr 和 σ 相似时, 入水速度降低, 头锥应力状态与原型存在差异, 在材料本构关系保持不变条件下, 变形过程不模拟原型状态。模型入水过程加速度曲线在入水卸载时间段内 $Vt / D < 2$ 与原型差异显著。在变体积力环境中, 基于 2.2 节所述的模型实验缩比相似关系, 入水过程模型状态入水速度与原型一致, 结构内应力状态也与原型状态相似, 模型流固耦合仿真计算加速度曲线与原型吻合较好。

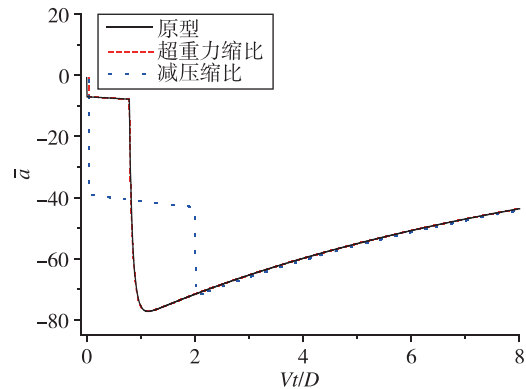


图 8 不同流固耦合缩比模型方案的入水加速度曲线对比

Fig. 8 Acceleration curve of different fluid structure interaction scaled model

以上理论分析和数值计算表明, 基于离心机形成的变体积力环境, 可在不改变水面压力, 以及原型和模型采用相同材料条件下, 保证跨介质缩比实验的结构变形和跨介质多相流动相似, 可较方便地分析结构变形和破坏对入水空泡流动的影响, 有望为入水结构变形吸能降载评估提供实验手段。入水流固耦合现象发生在入水后较短时间内, 科氏力对模型运动影响有限, 为基于变体积力环境研究跨水气界面流固耦合问题创造了条件。但实验方案设计中仍需通过约束入水前模型运动等技术手段, 最大限度降低科氏力的影响。同时, 在实验结果分析中也应注意科氏力扰动引起的物理现象。

3 结论

针对航行体跨水气界面空泡多相流动态演化以及结构形变流固耦合问题, 提出了利用离心机形成变体积力环境, 研究跨水气界面瞬态空泡演化黏性力影响以及结构形变影响的实验方案, 并进行了初步的仿真计算验证, 初步探索了跨介质问题研究新途径的可行性。

1) 通过流体和固体控制方程量纲归一化分析, 提出基于离心机的跨介质空泡动态演化流动黏性影响研究控制参数, 以及跨水气界面流固耦合问题研究方案。

2) 针对跨水气界面空泡动态演化流动黏性影响问题, 分别进行了开放水箱和密闭加减压水箱实验的流场仿真计算, 计算获得的不同尺度模型流场整体相似性较好, 计算捕捉到了湍流黏性变化影响, 并分析了旋转运动产生科氏力的影响。

3) 针对跨水气界面流固耦合问题, 在结构材料本构关系不变条件下, 考虑空泡宏观演化相似, 建立了多相流动和结构形变实验模拟方案, 入水流固耦合仿真计算表明, 该实验方法可较好地模拟跨水气界面入水流体力冲击。

参考文献

- [1] 唐一华. 水下垂直发射航行体空泡流动研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(1): 12-20.
- [2] Callenaere M, Franc J P, Michel J M, et al. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 444: 223-256.
- [3] Croci K, Ravelet F, Danlos A, et al. Attached cavitation in laminar separations within a transition to unsteadiness[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6): 063605.
- [4] Franc J P. Partial cavity instabilities and re-entrant jet[C]. 4th International Symposium on Cavitation, 2001.
- [5] Laberteaux K R, Ceccio S L. Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 431: 1-41.
- [6] Zhu X Y, Faltinsen O M, Hu C H. Water entry and exit of a horizontal circular cylinder[C]. Proceedings of ASME 2005 24th International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, 2008: 647-658.
- [7] Aristoff J M, Bush J W M. Water entry of small hydrophobic spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45-78.
- [8] Mäkiharju S A, Elbing B R, Wiggins A, et al. On the scaling of air entrainment from a ventilated partial cavity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 732: 47-76.
- [9] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds[J]. Journal of Computational Physics, 1974, 14(3): 227-253.
- [10] 郝常乐, 党建军, 陈长盛, 等. 基于双向流固耦合的超空泡射弹入水研究[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 678-687.
- [11] Qian H T, Feng S S, Shao Z Y, et al. Experimental study on the mitigation effect of polyurethane foam densities on the cylindrical objects entering water at high velocity[C]. Materials Science Forum, 2019, 950: 103-109.
- [12] Li Y, Zong Z, Sun T. Crushing behavior and load-reducing performance of a composite structural buffer during water entry at high vertical velocity[J]. Composite Structures, 2021, 255: 112883.
- [13] Shi Y, Gao X, Pan G. Design and load reduction performance analysis of mitigator of AUV during high speed water entry[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 314-329.
- [14] Hurd R C, Belden J, Jandron M A, et al. Water entry of deformable spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 824: 912-930.
- [15] Yang L, Wei Y J, Wang C, et al. Dynamics of the cavity evolution during vertical water entry of deformable spheres[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(6): 065106.
- [16] Waugh J G, Stubstad G W. Hydroballistics modeling

- [M]. Naval Undersea Center, 1972.
- [17] Bažant Z P, Palmer A. Scaling laws in mechanics of failure[J]. Journal of Engineering Mechanics-Proceedings of the ASCE, 1995, 121(7): 850.
- [18] Mäkiharju S A, Elbing B R, Wiggins A, et al. On the scaling of air entrainment from a ventilated partial cavity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 732: 47-76.

引用格式:辛万青,尤天庆.基于变体积力的跨水气界面多相流及流固耦合问题实验方法研究[J].宇航总体技术,2023,7(2):52-60.

Citation: Xin W Q, You T Q. Research on experimental method of multiphase flow and fluid structure interaction across water-air interface based on variable body force [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(2):52-60.