

引用格式: 钟诗蕴, 孙鹏楠, 吕鸿冠, 等. SPH 理论和方法在高速水动力学中的研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 29–48.

ZHONG S Y, SUN P N, LYU H G, et al. Research progress of smoothed particle hydrodynamics and its applications in high-speed hydrodynamic problems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3): 29–48.

SPH 理论和方法在高速水动力学中的研究进展



扫码阅读全文

钟诗蕴¹, 孙鹏楠^{*1,2}, 吕鸿冠^{1,2}, 彭玉祥¹, 张阿漫³

1 中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082

2 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082

3 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要: 船海工程领域中的高速水动力问题及其涉及的复杂流-固耦合过程普遍具有大变形、动边界、强对流、多介质等特征, 一直是研究的热点和难点。而传统的网格算法在捕捉边界或界面大变形时存在一定局限性, 亟待开发新一代无网格数值模拟技术。其中, 光滑粒子流体动力学 (SPH) 作为拉格朗日无网格粒子方法, 在捕捉多相界面和流-固耦合界面时具有较高的精度和强鲁棒性。近年来, 随着 SPH 理论及方法的不断完善, SPH 在理论完备性及计算稳定性方面取得了许多新的进步和突破, 在模拟高速水动力方面的优势不断凸显, 开始广泛应用于船海工程问题。为此, 围绕水面航行器的高速水动力、航行体的跨介质水动力、水下爆炸与结构毁伤等问题, 针对 SPH 理论及方法在上述领域取得的研究进展进行综述, 讨论现有方法面临的问题与挑战, 并展望未来需要开展的研究工作, 旨在为后续相关研究提供参考。

关键词: 高速水动力; 光滑粒子流体动力学; 计算力学; 流-固耦合

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02758

Research progress of smoothed particle hydrodynamics and its applications in high-speed hydrodynamic problems

ZHONG Shiyun¹, SUN Pengnan^{*1,2}, LYU Hongguan^{1,2}, PENG Yuxiang¹, ZHANG Aman³

1 School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China

3 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: High-speed hydrodynamics and its corresponding complex fluid-structure interactions (FSI) are challenging topics associated with naval architecture and ocean engineering, typically characterized by large deformations, moving boundaries, strong convection and multiple fluid media. Since traditional mesh-based numerical methods possess limited ability to accurately simulate such strongly nonlinear problems, it is imperative to develop meshless numerical schemes with high fidelity and robustness to tackle this dilemma. As one of the most promising truly meshless methods, smoothed particle hydrodynamics (SPH) shows apparent advantages in high-speed hydrodynamics problems thanks to its Lagrangian nature. In the present paper, the attention is particularly focused on the latest advances of several SPH techniques with respect to the following high-speed hydrodynamics problems: vessel-induced waves and wakes, the water entry process of projectiles, and underwater explosion and its resulting structural damage; in addition, the future prospects of SPH are provided in the last part of the paper.

Key words: high-speed hydrodynamics; smoothed particle hydrodynamics; computational mechanics; fluid-structure interaction

收稿日期: 2022-01-07

修回日期: 2022-03-03

网络首发时间: 2022-05-18 13:39

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12002404, 52171329); 广州市基础与应用基础研究资助项目 (202102020371)。

作者简介: 钟诗蕴, 女, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 无网格数值算法, 光滑粒子流体动力学, 流固耦合水动力学。

E-mail: zhongshy7@mail2.sysu.edu.cn

孙鹏楠, 男, 1991 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船海流固耦合动力学, 光滑粒子流体动力学理论与计算方法。

E-mail: sunpn@mail.sysu.edu.cn

吕鸿冠, 男, 1994 年生, 博士生。研究方向: 无网格数值算法, 光滑粒子流体动力学, 流固耦合水动力学。

E-mail: hongguanlyu@163.com

*通信作者: 孙鹏楠

0 引 言

面向海洋强国的战略需要,船舶与海洋工程得到了大力发展,与之相关的结构力学和水动力学等领域均产出了丰硕成果^[1-3]。其中,高速舰船兴波^[4]、航行体(器)出水与入水^[5]、水下爆炸与结构毁伤^[6-7]等典型高速水动力学问题与现代舰船及其武器装备的综合性能密切相关,但这些问题都具有大变形、动边界、强对流、多介质等复杂特征,而运用传统理论、试验或数值模拟方法较难得到彻底解决,因此,近年来成为了研究热点和难点^[8-9]。

高速水面航行器的兴波、飞机水上滑行等过程涉及了复杂曲面结构物与自由液面或水气界面的复杂耦合作用,剧烈的液固耦合运动易产生非线性翻卷和破碎波浪^[10],甚至会引起液滴强烈飞溅,对航行器的结构及内部仪器零件的安全性构成威胁,且诱导的噪声^[11]和尾迹^[12-13]对航行器隐蔽性极为不利,精准捕捉兴波水花飞溅和预报砰击载荷关系到航行器的隐身性、安全性设计。

在军民领域,抛落式救生艇入水、飞行器海上回收,鱼雷空投入水、潜射导弹出水等航行器或结构物高速出、入水的问题^[14-15]涉及瞬态强冲击载荷、结构物大幅运动、气泡生长与溃灭等复杂过程^[16],是典型的多相流-固耦合问题^[17]。这种高速跨介质过程所产生的巨大砰击载荷,一方面可能造成装备结构损坏、内部零件失灵,另一方面也可能引起航行器弹道失稳、投放失效等。因此,研究航行器的高速出、入水问题对于跨介质武器装备等的研发有着重要意义。

研究表明,水下爆炸冲击波峰值及冲量相比空中爆炸有明显提高^[18]。舰船遭受近场水下爆炸时,冲击波、高速射流和破片等首先对舰船造成局部毁伤^[19],随后的气泡脉动和射流冲击可能造成舰船整体失效^[7]。近场水下爆炸导致船体出现破口以后,剧烈涌流还可能会进一步造成船体结构损坏,最终导致船体沉没。考虑到水下爆炸过程的复杂性和试验研究的高成本,研发精准的数值计算方法,预报水下爆炸载荷、结构毁伤和舰船破损沉没过程成为了各国海军研究的重点^[19]。

对于上述高速航行器的兴波、航行体出水和入水、水下爆炸与结构毁伤等工程问题,其背后的基础力学问题离不开对复杂运动结构物与多相流体之间的流-固耦合过程的求解。研究人员针对不同场景下的力学过程进行简化和凝练,提出了多种理论模型^[20-21],解释了气泡动力学或简单构

型结构物与流体作用过程背后的力学机理。然而,理论模型对于复杂的工程实际问题适用性有限。而模型试验虽然是获得可靠结果的重要手段^[4,22],但开展试验通常需要较大的场地和昂贵的设备,尤其是在高速水动力问题的模型试验中,尺度效应明显^[23],相关物理参数测量困难,试验数据的可重复性较差,试错成本也高。

近年来,随着计算机技术的发展,涌现出了许多数值计算方法。目前,基于不同的离散和求解形式,数值模拟方法可分为有网格法和无网格法^[24]。前者在解决大变形流-固耦合问题时容易受到网格畸变的困扰;后者得益于天然的拉格朗日特性及逐渐完备的粒子近似理论优势,在模拟大变形问题时不受边界变形量的限制^[25],故在高速水动力问题中得到了广泛应用^[24]。典型的无网格法包括离散元法(discrete element method, DEM)^[26]、光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法^[27-29]、移动粒子半隐式(moving particle semi-implicit)方法^[30]等。MPS方法和SPH方法在求解水动力问题方面难分伯仲^[31-34],但MPS方法基于完全不可压缩假设^[35-36],难以应用于压缩效应明显的问题,例如水下爆炸的气泡脉动过程等;而DEM是离散元算法^[37],主要用于处理离散粒子(例如沙砾、冰块等颗粒流)大变形问题^[38-40],并不适用于高速水力学研究。相较而言,SPH理论和方法在处理流体大变形和可压缩问题时的优势明显,便于开展并行计算,工程适用性强,更适合于求解大型高速水动力问题。

海洋结构物在高速航行或跨介质运动时,对自由液面以下的单相流动区域,准确模拟湍流边界层是关键^[41]。针对这方面的应用,有网格法因其湍流模型较为成熟、便于采用多分辨率网格技术而受到研究人员的青睐^[42]。但对于自由液面或多相界面附近区域,因存在流体高速砰击引起的液滴飞溅和水气掺混等过程,有网格法的精度容易受到网格尺度的极大限制^[24]。例如,一旦液滴飞溅到网格稀疏区域,易引起流体质量不守恒造成的液滴飞溅消失。相比而言,SPH无网格粒子法用于模拟液滴飞溅问题更具优势^[4,22]。该方法基于核近似、粒子近似和虚粒子边界等基本原理,辅之以日益完善的高精度修正理论和技术,在模拟运动边界和大变形界面等问题时具有较强计算能力和广阔发展前景。

尽管SPH方法在计算的全过程中能够精确满足质量守恒要求并擅长捕捉自由液面翻卷、破碎和喷溅等复杂现象,但运用传统SPH方法计算的压力载荷一般伴随严重的数值噪声^[43],涉及复

杂区域时还容易引起张力不稳定性数值空洞等^[44]。为解决这些问题,经过近半个世纪不断发展,SPH 方法在理论和数值技术方面得到了不断优化,计算精度和稳定性获得巨大提升,在新一代 GPU 并行技术的加持下,显著提高了计算效率^[45],具备了求解工程问题的能力。并且,随着嵌入 SPH 的多算法耦合技术的出现和发展^[6, 46-47],SPH 理论和方法的优势得以充分发挥,使其为复杂多元的高速水动力学问题提供了新的高精度、高效率求解方案。

综上所述,为进一步阐述 SPH 理论和方法在船海高速水动力学相关问题中的研究进展,本文将从 SPH 的基本原理及数值技术研究进展出发,围绕高速水面航行器的水动力以及高速跨介质航行器水动力问题、水下爆炸与结构毁伤等方面展开综述,并对 SPH 理论和方法在求解高速水动力学问题中的未来发展趋势进行展望,以期为涉及上述问题的相关研究提供参考。

1 SPH 理论及技术进展

1.1 SPH 基本理论与算法

1.1.1 SPH 基本理论

SPH 方法最初是为研究天体动力学而提出的^[48],上世纪 90 年代开始应用于水动力问题的模拟^[49]。以物体入水问题为例,图 1 给出了基于流体体积 (volume of fluid, VOF) 的欧拉网格法^[50]及拉格朗日描述的 SPH 方法^[51-52]模拟圆柱体及楔形体入水以及液面飞溅的过程。在欧拉网格法的计算结果中,可见喷射射流尖端存在非物理性流体消失,水气界面较模糊的情况,而 SPH 方法中粒子可以精确地捕捉到流体飞溅特征。上述结果体现了 SPH 方法在处理大变形问题方面的优势,因此被

广泛应用于船海工程领域^[5, 53]。

从原理上看,SPH 方法基于核函数近似理论计算空间导数,可对特定物理场的梯度、散度等采用积分形式进行计算^[54];在数值实现方面,SPH 方法一般将流体域离散成紧凑的拉格朗日粒子,每个粒子均具有相应的质量和体积,通过粒子求和代替核近似中的积分,也称“粒子近似”。如图 2 所示,基于核近似理论和粒子近似理论,SPH 方法可对控制方程进行离散求解。图中: f 和 $\mathbf{f}$ 分别代表标量和矢量; $\rho, \mathbf{u}, p, \mathbf{r}, V$ 分别表示密度、速度、压力、位置矢量和体积,下标 i 和 j 表示粒子编号; $\mathbf{g}, \mathbf{T}, \mu$ 分别表示重力加速度、应力张量和动力黏性系数; W 为核函数; h 为光滑长度; c_0, ρ_0 分别为流体声速及其参考密度。为获得更高的压力场、速度场计算精度,可在离散控制方程中进一步添加耗散项^[24]。随后,在特定的初始条件和边界条件(自由液面边界^[55]、壁面边界^[56]、流入流出边界^[57]、无反射边界^[58]等)下,将离散控制方程在时域内进行积分,可获得 SPH 控制方程的数值解。

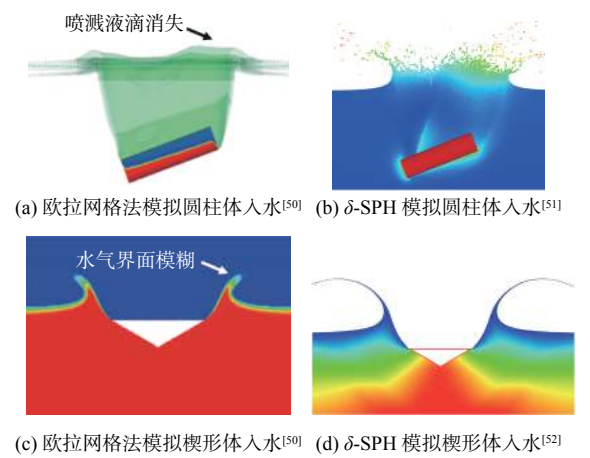


图 1 三维圆柱体和二维楔形体入水数值模拟结果
Fig. 1 Numerical simulations of water entry of a 2D wedge and a 3D cylinder

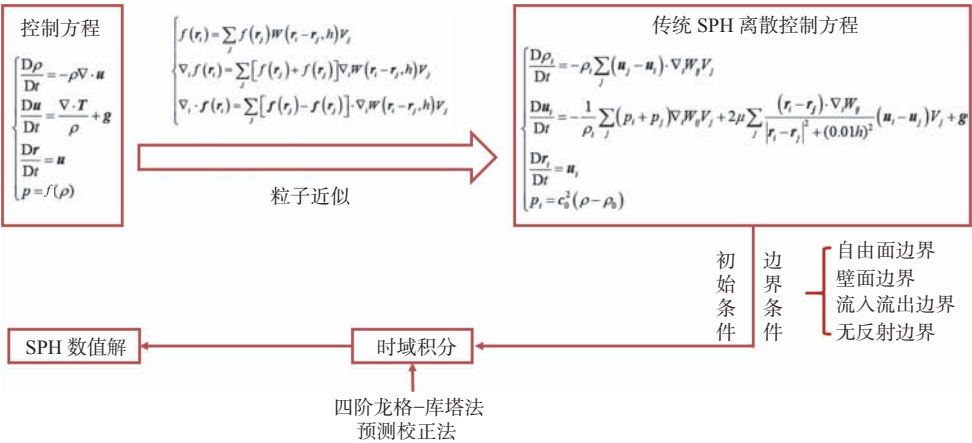


图 2 SPH 方法求解流程^[24]
Fig. 2 The process of SPH simulation^[24]

SPH 粒子携带各自的速度、压力、密度等物理量,按照流体质点本身的速度进行拉格朗日运动。这些粒子的运动代表了流体的流动,粒子所到之处也代表了所处位置的流场速度、压力、密度等物理量的变化。鉴于 SPH 理论和方法的拉格朗日特性及无网格粒子特性,在模拟自由液面流动问题时,自由面的运动学条件不仅能够自动满足^[55],而且也能够自动追踪水气和流-固界面,所以十分适合处理船海工程中的大变形、动边界、多介质和强对流的流体动力学问题^[8]。

1.1.2 SPH 算法的分类

经过近半个世纪的发展,基于不同的理论框架,SPH 方法已发展出了多种形式,主要包含两种类型:弱可压 SPH (weakly compressible SPH, WCSPH) 方法^[43]和不可压 SPH (incompressible SPH, ISPH) 方法^[59],并已在各自领域得到广泛的应用。对于水介质,一般认为其近似于不可压缩,但为便于求解压力,Monaghan 等^[49]最早引入了状态方程,如图 2 所示控制方程中的第 4 个等式。基于状态方程求解压力时,积分的时间步长受到克朗条件(Courant-Friedrichs-Lewy condition),也即流体声速的极大限制。此外,Monaghan 等^[49]还提出了弱可压假设,以马赫数小于 0.1 为标准确定人工声速,确保流体密度变化不大于 1%,以此维持流体的近似不可压特性,所以该方法也被称为 WCSPH 方法。相反,在 ISPH 方法中,流场的密度保持不变,亦即速度散度处处为 0。Cummins 和 Rudman^[59]在 SPH 方法框架内,建立了每个时间步的泊松压力方程,用于求解压力,并提出了 ISPH 方法来模拟不可压缩流动问题。但是,ISPH 方法涉及大型稀疏矩阵运算和自由液面粒子搜索,计算量相对较大^[60-61],在大规模粒子数量的三维计算中挑战较大。WCSPH 相关理论和方法经过近 20 年的发展,计算精度已得到明显提高,相比于 ISPH 方法,WCSPH 方法涉及的 GPU 存储量更小,计算效率更高,所以更适用于开源程序的设计。例如 DualSPHysics^[62]、SPHinxsys^[63]等开源程序包,它们均是基于 WCSPH 理论框架,目前已被广泛应用于模拟三维复杂自由液面流动等问题。

1.2 SPH 数值技术的进展

1.2.1 SPH 压力计算精度

在船海流体力学中,准确计算压力对流体砰击载荷预报至关重要。传统 WCSPH 模型计算压力场时,一般会出现难以避免的压力场噪声,其主要原因是:

1) SPH 核函数的近似误差和数值离散误差会导致密度场出现波动,微小的密度波动被状态方程放大,变成剧烈的压力场噪声;

2) 因流体的弱可压假设,声速一般会被降低。在出现流体砰击时,砰击位置辐射的压力波以较小的声速在流场中传播,遇到边界时会发生多次反射和叠加,同样也会在流场中表现为压力场噪声。

针对压力场噪声问题,Colagrossi 等^[43]率先提出 SPH 密度过滤技术,成功缓解了 SPH 压力场脉动。Vila^[64]通过 Riemann 求解器来计算粒子间的相互作用,提出了 Riemann SPH 方法,此方法能够将 SPH 数值误差和弱可压假设造成的压力脉动进行快速耗散,从而提高压力场的光滑性。Marrone 等^[56]提出 δ -SPH 方法并应用于自由液面流动的模拟,该方法引入了密度耗散项 D^ρ ,该耗散项起到与 Riemann 求解器相似的耗散作用,也同样能够提高压力场的计算精度。图 3 所示的 δ -SPH 控制方程中, T^v 表示黏性力张量。相比 Riemann SPH 方法, δ -SPH 方法的优势在于数值耗散量可通过连续方程中的密度耗散项^[65]进行定量控制,从而实时监测流体能量的耗散量,这对于 SPH 数值波浪水池的建立十分有益。

1.2.2 SPH 粒子均匀化技术

传统 SPH 理论基础和算法精度很大程度上依赖于粒子分布的均匀性^[66]。为此, Nestor 等^[67]最早提出了粒子位移修正方法 (particle shifting techniques, PST),而 Lind 等^[68]将 PST 方法引入到自由液面计算中,初步解决了 ISPH 模拟中的粒子不均匀及流场撕裂的问题。如图 3 中第 3 个框图所示, Sun 等^[69-70]将 PST 技术与 δ -SPH 进行结合,提出了 δ^+ -SPH 方法 (其中, δu 为修正速度项, m 表示粒子质量),随后又发展出了张力不稳定性控制 (tensile instability control, TIC) 技术^[44],克服了高负压区域的流场数值空洞问题,并成功应用到中、高雷诺数的黏性边界层流动的模拟中。其后,又进一步建立了满足一致性的 δ^+ -SPH 方法,将 PST 技术中位移修正以修正速度的方式表示,并在控制方程予以考虑,从而解决了早前 PST 技术造成的自由液面流动中流体体积的非物理性膨胀问题,极大提高了 WCSPH 理论和方法的精度及稳定性^[70]。最近, Antuono 和 Sun 等^[66]又建立了任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 形式的 δ -ALE-SPH 理论与方法,将质量方程和质量数值耗散项 D^m 引入到控制方程中,提高了 ALE 算法的稳定性,进一步完善了含粒子位移修正的该 SPH 理论框架。针对海洋工程应用问

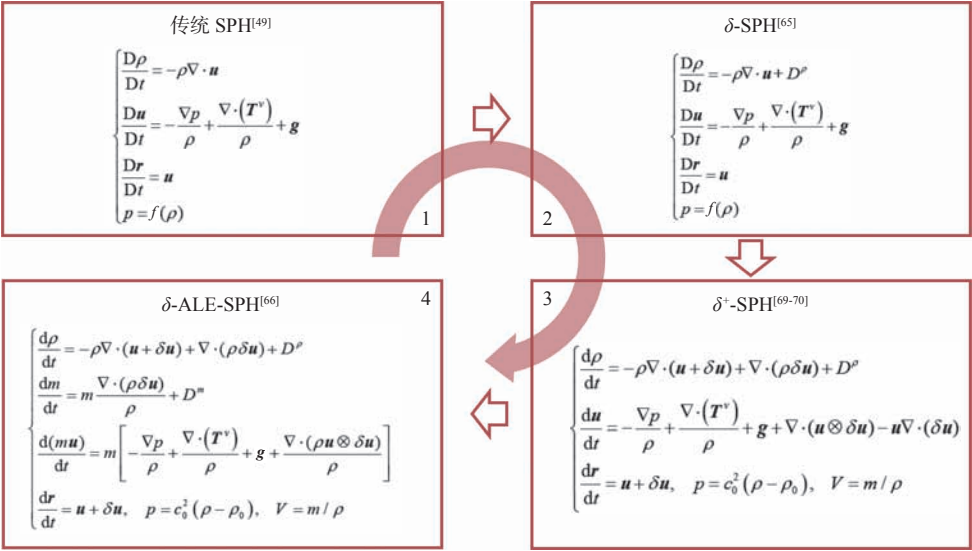


图 3 SPH 理论和方法的演化

Fig. 3 The evolution of SPH theory and method

题, Lü和 Sun 等^[5, 17]针对液舱的晃荡、物体出水 and 入水、黏性绕流等问题进行了深入分析, 从理论角度指出了此类问题中张力不稳定性产生的原因, 有针对性地提出了完备的控制技术, 以克服张力不稳定性问题。

1.2.3 高精度 SPH 理论和离散格式

制约 SPH 方法计算精度的另一个重要原因是, 传统 SPH 理论和方法离散格式本身的精度不够, 误差主要来源于核函数近似误差和粒子近似误差, 其中后者又被称为数值离散误差。因此, 为提高 SPH 方法的计算精度, 研究人员先后提出了修正 SPH 算法^[71]、移动最小二乘算法^[72]、有限粒子法^[73]以及近两年发展的高阶 SPH 方法, 例如 WENO-SPH 方法^[74]、TENO-SPH 方法^[75]等。高阶 SPH 理论是在 Riemann SPH 的基础上发展而来, 其通过引入网格法的高阶计算框架来提高求解精度。如图 4 所示, 在 Riemann SPH 控制方程中, e 表示比内能^[75], p^* 和 $\mathbf{u}^*$ 分别表示粒子对之间的压力及速度^[76], 是 Riemann 方程求解的中间变量, 也是重构框架的作用对象。Meng 和 Zhang 等^[75]提出的 TENO-SPH 理论和方法, 有效提高了 SPH 方法的计算精度和鲁棒性, 验证了高阶 SPH 理论和应用的可行性。此外, 为减少离散误差, 可通过增加光滑长度与粒子间距的比例系数, 来增加核函数半径范围内的粒子数量, 达到减小离散误差的目的, 使之满足理论要求, 提高 SPH 方法的计算精度, 具体详见文献^[77]。尽管高精度 SPH 方法在解决特定问题方面明显提升了计算精度, 但在物理量守恒性及算法稳定性上仍有很大的改善空间。对于工程化应用, 因涉及了巨大的粒子数量和较长模拟时间, 目前仍普遍采用传统的 SPH

数值离散理论, 辅之以 δ -SPH 或 Riemann SPH 等数值方法, 能够严格保障质量、动量的守恒特性, 实现对自由液面流动的长时间的稳定数值模拟。

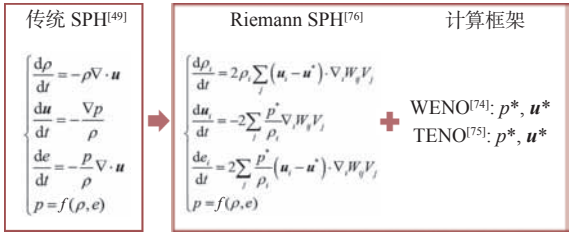


图 4 高阶 SPH 理论和方法示意图

Fig. 4 Schematics of the high-order SPH theory and method

1.2.4 SPH 方法的工程应用

随着 SPH 理论和方法的不断发展, 其已被广泛应用于海洋工程领域。事实上, SPH 工程化应用的重要前提是其具备了复杂结构物的粒子化建模和离散能力, 以及复杂形状边界条件的处理能力。经过数十年的发展, 慕尼黑工业大学 Zhu 等^[78]开发出了基于 STL 格式文件的粒子化填充算法, 并已成功用于复杂构型结构物的粒子化离散。图 5 所示为飞机模型从 CAD 到粒子化的离散过程, 这为后续的工程化应用研究奠定了良好的基础。基于离散后的粒子, 将其设置为虚拟粒子 (ghost particle), 采用基于固定虚粒子 (fixed ghost particle) 的固壁边界理论和技术^[56, 79], 即可实现固定、运动甚至变形的壁面边界的高精度施加处理^[51, 80]。

1.2.5 SPH 硬件加速技术

在 SPH 数值计算中, 精确反映三维复杂结构物构型通常需要设置精细的粒子分辨率, 故也必然导致高昂的计算成本。随着计算机技术的快

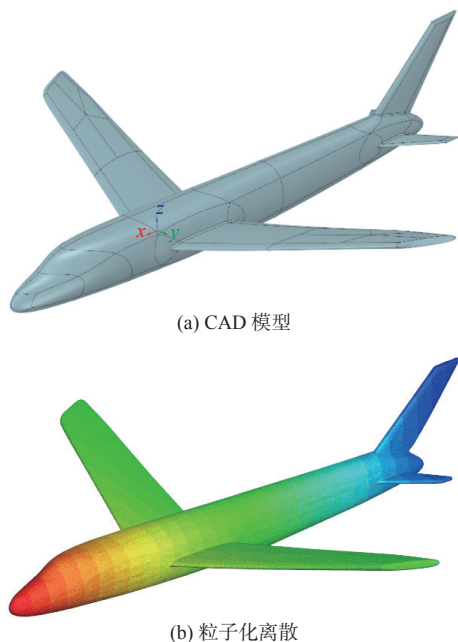


图 5 复杂构型结构物的 CAD 建模和粒子化离散

Fig. 5 CAD modeling and particle discretization of a complex structure

速发展,硬件并行计算技术的出现极大地提高了 SPH 方法的计算效率,推动了 SPH 方法的工程化应用^[45,60]。硬件加速技术一般可基于 CPU 或 GPU 两种并行计算框架。绝大部分网格法(例如有限体积法(FVM)等)均采用 CPU 并行计算,原因是该方法需要求解大型稀疏矩阵和隐式时间积分,并不适合或较难采用 GPU 并行计算。而弱可压 SPH 方法作为一种纯拉格朗日粒子方法,其计算原理基于点对点的方式,且时间积分为显式格式,这两个特性决定了 SPH 方法非常适合用于 GPU 并行计算。目前,大量文献已表明,在同等模拟规模下 SPH 方法的 GPU 并行可比 CPU 并行在效率上提高 1~2 个数量级^[45],极大提升了 SPH 方法的工程实用性,尤其是基于该方法开发的计算软件能够在装有 GPU 的个人电脑上运行^[62],并不完全依赖于大型超级计算机或服务器,因此在未来工程领域有较大的应用潜力。

当前,实现 SPH 并行计算首先可基于并行计算框架,自主编制 SPH 程序,例如 Marrone 等^[22]搭建的 MPI-OpenMP 混合编程模型,设计了一种新型的三维并行 SPH 求解器,成功实现了对三维船体兴波的全局仿真,为自主构造 SPH 并行计算模型提供了参考。此外,还可以采用目前主流的并行 SPH 开源程序包完成计算,例如 SPHinXsys^[63]、DualSPHysics^[62]等开源程序包,它们均在三维复杂问题应用方面有出色表现^[81],为高精度 SPH 理论和方法在船海工程中的实际应用提供了强大的计算能力保障。

2 水面航行器高速水动力问题

随着上述数值技术的发展和运用,运用 SPH 理论和方法求解实际工程问题的能力得到了不断加强。SPH 方法利用其在处理自由液面大变形和喷溅问题方面的优势,可以十分方便地对高速水动力问题开展相关研究。例如,图 6 展示的是三维 SPH 方法模拟的“中山大学”号(SYSU)科考船高速航行兴波和飞机水上迫降过程。由图可见,SPH 方法准确再现了自由液面的翻卷、破碎、喷溅过程。

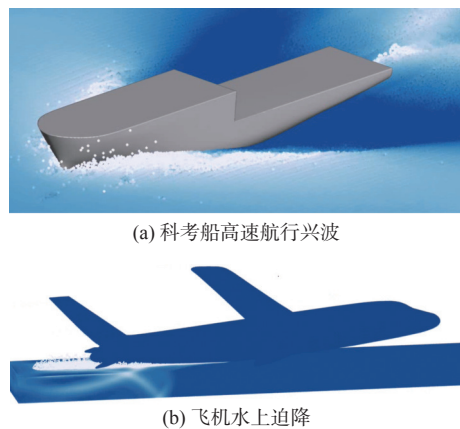


图 6 三维 SPH 方法模拟的“中山大学”号科考船高速航行兴波和飞机水上迫降

Fig. 6 3D SPH simulations of the breaking wave of SYSU research vessel in high-speed and the aircraft ditching process

以下将围绕航行器的兴波与非线性波浪砰击等问题,对 SPH 理论和方法在水面航行器高速水动力问题中的应用研究进展进行综述。

2.1 高速水面航行器兴波

目前,计算流-固耦合问题通常使用有限元法(FEM)、FVM 等工业化程度高、应用发展较为成熟的求解器,例如,常使用 VOF^[82]或 Level-Set^[83]等方法模拟自由面流动。在单相、小变形、低弗劳德数的情况下,使用以上的网格法模拟航行器的兴波和尾流可以得到精准结果,但对高速航行过程中产生的强非线性自由液面流动、流体喷溅等情况,网格法较难精准捕捉到波浪破碎、浪花飞溅等细节。图 7 展示了 FVM 和 SPH 方法模拟高速舰船兴波的结果与 Tagliafierro 等^[84]的模型试验结果的对比。由图可见,FVM 只能模拟出微幅的液面变形,而 SPH 方法能够很好地捕捉液面的飞溅细节。可见,SPH 充分发挥了拉格朗日粒子方法的理论优势,能更准确模拟兴波特征。

早期的计算机内存和效率低,三维仿真计算成本高,故一般采用切片法、二维半^[85-86]理论研究

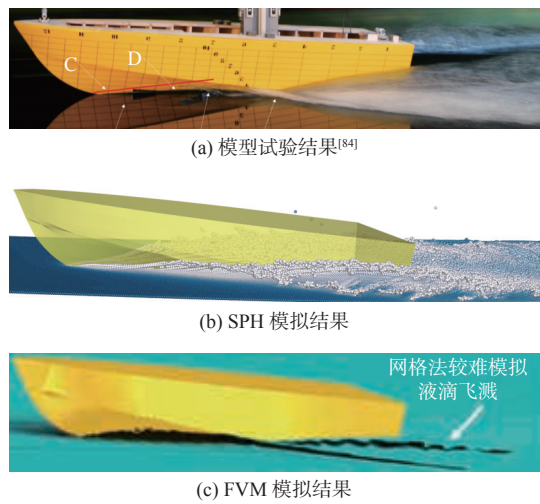


图 7 高速滑行艇兴波各方法模拟结果对比
Fig. 7 Comparison of wave-making of high-speed planning boat

航行器的兴波问题。Marrone 等^[4]通过 2D+t SPH 方法对细长船体兴波的问题进行研究,对不同弗劳德数下的船艏兴波演化和尾迹进行模拟,较成功地模拟了细长船舶两侧兴波特征,并通过试验对比验证了结果的准确度。但是,2D+t SPH 方法的研究对象局限于纵向速度变化小的细长船体,对于横剖面变化大的复杂构型,只有进行三维仿真才可以尽可能全面地保留兴波特征。最近,Mintu 等^[87]成功实现了实尺度高速舰船船艏破波的三维模拟,验证了三维 SPH 计算方法的数值精度和技术可行性。

与真实试验结果^[84]相比,SPH 方法已可以初步模拟船体两侧喷射的水花,如图 7 所示,但目前仍未能对微小尺度的水气混合多相流实现精准捕捉。高密度比混合多相流模拟是未来 SPH 方法的发展方向,需选用更精细的粒子分辨率、开发新的理论和数值模型进行求解。Monaghan 和 Kocharyan^[88]首次提出了基于体积分数理论的 SPH 混合物模型,经过十余年的发展,Fonty 等^[89-90]提出的 SPH 混合物模型在模拟振荡水柱波浪能转换器的水-气高速耦合作用方面表现优越,可进一步拓展应用于航行器(体)的兴波模拟中。SPH 混合物模型在高速水动力学应用领域发展前景广阔,相信未来会应用于模拟兴波水花及其他高密度比多相流体扩散、混合过程。

2.2 非线性波浪砰击

2.2.1 SPH 数值造波与消波

水面航行器高速航行时会受到反复交替的非线性波浪砰击载荷作用,尤其是在恶劣海况下,波浪力所引起的砰击压力和力矩可能会造成海洋结构物的局部毁伤甚至整体倾覆,因此研究波浪

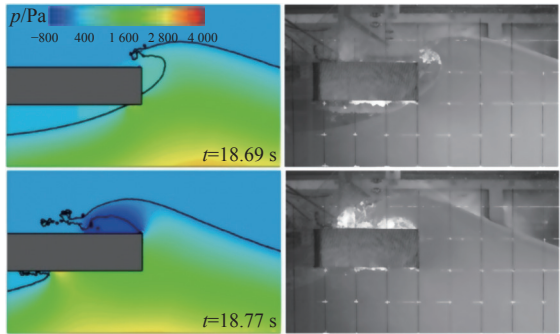
与浮体耦合作用意义重大。近年来,数值波浪水池以及波浪与结构物的耦合作用模型迅速发展,其中数值造波与消波技术成为研究重点。得益于 SPH 方法模拟动边界的天然优势,SPH 方法可通过固定虚粒子理论和技术构建数值造波板,对其运动予以控制,模拟物理水池中的推板式^[91]、活塞式^[92]、摇板式^[93]等造波机,生成多种形式的波浪^[94]。

SPH 数值水池消波技术可分为被动消波和主动消波。被动消波是指通过斜坡和多孔结构^[95]或在数值水池中设置人工阻尼区进行消波^[92,96],而主动消波方法是通过改变数值造波板的运动机制达到消波目的。虚粒子组成的造波板会根据反射波的变化重新调整运动方程,使反射波与新生成的波叠加形成与原波形一致的波浪^[91],从而保证结构物受恒定的数值波浪作用。研究表明,SPH 方法可以产生包括不规则波^[91]、畸形波^[94]、孤立波^[92]等各类波形,造波质量较高,为进一步研究浪固耦合问题提供了技术支撑和保障。

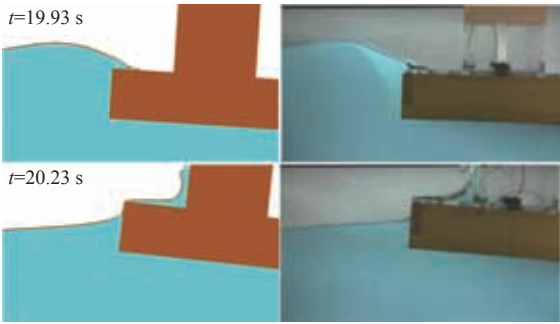
2.2.2 甲板上浪与畸形波砰击

若巨幅波浪砰击船体、海洋平台等结构物,一般会造成严重的波浪爬升,甚至可能翻越甲板,发生甲板上浪现象,导致甲板设备严重毁坏或人员伤亡等,因此,受到了研究人员的高度重视^[97-98]。早期的 SPH 方法在研究舰船甲板上浪问题时,为降低计算难度,通常是通过二维仿真波浪冲击翻越固定水平平板^[10]过程来进行研究。而伴随着计算机计算能力的提高,现已能够对舰船航行的上浪情况进行三维模拟,进一步研究甲板上浪对上层建筑的破坏力^[99]。为更精确预报砰击载荷,Areu-Rangel 等^[100]通过对比 SPH 方法的仿真结果和精密实验仪器的测量结果,优化了甲板上浪的 SPH 数值模型,该方法用于预报甲板上浪压力载荷的精度得以验证,有效性和可行性也得到证明。

传统的规则波和不规则波理论难以解释深海中时常出现的极大波高,因此,近年来兴起了对极端海况下畸形波和畸形波砰击海洋结构物的研究。Sun 等^[94]基于规则波和畸形波理论,采用推板和摇板式造波数值技术联合人工阻尼消波技术,建立了数值波浪水池的 SPH 数值模型,以研究规则波、聚焦波与结构物的浪固耦合作用,结果如图 8(a)所示。针对 Zhao 等^[101-102]提出的畸形波-结构物耦合运动算例,SPH 方法可预报浮体结构物的纵荡、升沉、纵摇运动和波浪砰击、甲板上浪、回流等现象,计算结果与试验结果吻合,如图 8(b)所示。



(a) 波浪砰击固定结构物^[94]: SPH 数值结果 (左) 与试验现象 (右)



(b) 波浪砰击浮动结构物: SPH 数值结果^[24] (左) 与试验现象^[101] (右)

图 8 SPH 数值波浪水槽模拟的非线性波浪砰击固定或浮动结构物的结果对比

Fig. 8 The results comparison of nonlinear wave slamming on a fixed or floating structure simulated in a SPH numerical wave flume

畸形波砰击过程中会卷入气体, 波浪翻卷上涌甲板后, 受气相的影响出现负压区, 如图 8(a) 所示。Sun 等^[94] 通过研究砰击过程中的负压现象, 指出一次砰击过程相当于进水与出水过程的耦合, 非线性波浪砰击退去后, 会在结构下方 (例如外漂底部) 产生负压, 而负压在 SPH 方法中会带来张力不稳定性, 随之造成非物理性的流场空洞并导致流场演化的错误。文献 [94] 模拟结果还表明, 当波浪砰击甲板边缘时, 由于砰击速度高, 卷入的气穴会形成负压 (相对于背景压力) 而导致流体吸附。此时, 流体并不会立即在甲板上分离, 而是在甲板表面形成高速吸附流, 这就要求 SPH 模拟能精确地预报流场中负压形成的吸附力。对于此问题的研究, 研究人员建议使用 SPH 张力不稳定性控制技术^[44]。此外, 波浪翻越甲板的过程还需考虑空气的气垫效应^[94], 否则容易导致压力峰值预报失真。总之, 涉及甲板上浪的浪固耦合问题还需进一步完善 SPH 的理论和方法, 建立多相流 SPH 模型^[17], 在考虑空气影响的情况下进行数值模拟研究。

3 航行体跨介质水动力问题

航行体跨介质过程是指物体出水和入水, 实质上也是一个复杂的多相流-固耦合过程。流体

与结构物的相互强耦合可能导致相变、湍流和空化, 力学机理极具复杂性和挑战性。目前, 对出水和入水力学机制的研究方法主要采用试验方法^[103]、数值模拟^[51] 或两者结合的方法。研究表明, SPH 方法能很好地模拟此类大变形、多边界和多相流问题^[15]。

3.1 细长体入水

细长航行体入水是典型的瞬态强非线性动力学过程, 入水瞬间的砰击作用会造成强烈的液面变形, 形成液滴喷溅。面对此类问题, 网格法受网格尺度限制, 对喷溅的模拟略显逊色。图 9 给出了采用 SPH 方法、VOF 方法计算模拟细长圆柱体 (细长体) 以 100 m/s 高速入水的结果对比。由图 9 可见, 网格法 (VOF) 难以捕捉到喷溅细节, 多相界面相对模糊, 而 SPH 方法在流场喷溅特性的捕捉方面表现更佳。图 10 所示为该算例中运用不同算法预报的细长体端部砰击压力和运动速度曲线。由图 10 可见, SPH 方法能够精确地捕捉到瞬态冲击载荷的峰值, 获得的细长体运动速度与 CEL 方法更吻合。可见, SPH 方法能够精确地对航行体高速入水冲击进行仿真, 尤其是液面喷溅模拟方面的优势更明显。

高速入水问题主要关注细长体结构局部砰击区域所受载荷及其附近流场的演化过程, 而远场流动变化随着距离的增大而减小。因此, 为了保证局部高精度的同时提高计算效率, Sun 等^[44] 采用自适应粒子细化技术 (adaptive particle refinement, APR) 对大范围的计算域分设多级粒子分辨率。该技术也能根据需求定义高分辨率区域, 通过此区域动态跟踪细长体结构运动的过程, 并可对整个弹体周围流场区域进行加密, 精准预报流体对弹体和弹道的影响, 如图 11(a) 所示。此外, APR 技术也可仅对弹体头部进行局部加密, 捕捉

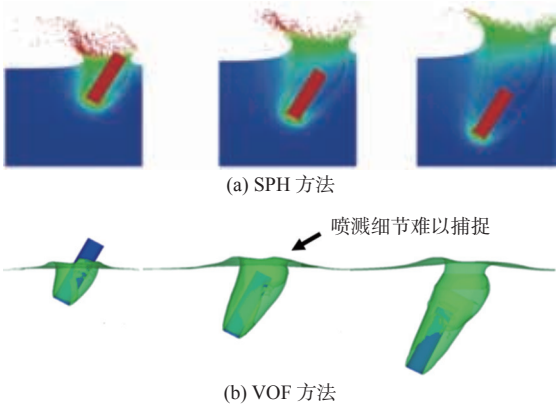


图 9 不同方法模拟的细长体高速入水结果对比^[50]
Fig. 9 Comparison of high-speed water entry of a slender body simulated by SPH and VOF^[50]

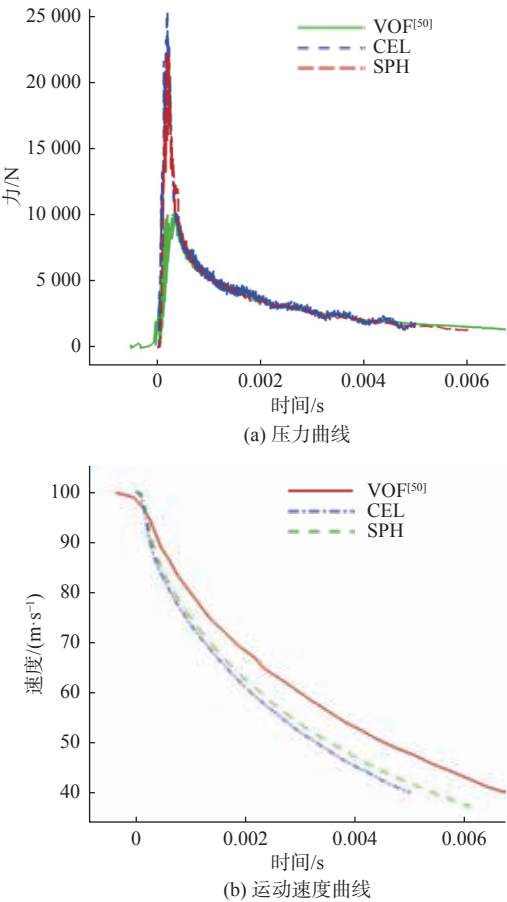


图 10 细长体高速入水砰击压力与运动速度变化曲线
Fig. 10 Time evolution of impact pressure and velocity of the slender body during high-speed water entry

弹头区域的流动特征,如图 11(b)所示(Δx 表示粒子间距)。总之,APR 技术为 SPH 方法实现高效精准的仿真提供了技术支撑。

前人基于 SPH 方法的许多入水问题的研究,例如旋转^[104]、倾斜^[105]入水的仿真以及空腔演化特征等,大部分忽略了空腔闭合后的内部气体对结构运动的影响。首先,这是因为空腔闭合后会产生高速射流^[17],冲击结构物表面并造成运动姿态变化,所以空腔的产生及气相的影响对结构载荷与运动预报有着重要意义^[103, 106],需要采用多相流 SPH 模型开展计算,详见文献^[17]。其次,砰击入水的高速运动会导致细长体周边产生空化,且目前 SPH 理论框架内尚未建立完备的空化理论和数值模型,如何做到空化、湍流^[107]、多相 SPH 模型的结合以实现精准数值预报仍有待深入研究。

3.2 细长体出水

SPH 方法为细长体高速入水过程的模拟提供了可靠数值方案,对于细长体出水过程其同样具有较精确的预报能力。此外,高速出水过程还涉及复杂气-液-固三相的耦合,包括瞬态强冲击载荷、空泡产生及演化和流-固耦合效应等,这也是

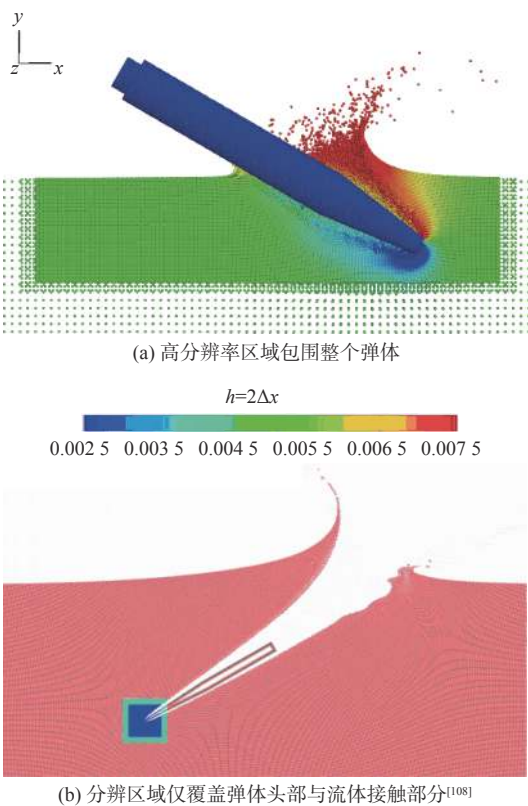


图 11 多级粒子分辨率 SPH 技术模拟的细长体高速入水过程
Fig. 11 High-speed water entry process of a slender body simulated by SPH with APR technique

工程前沿所要研究的重要课题。为此,前人开展了丰富的数值和试验研究,包括球体出水^[109]和圆柱出水仿真并结合试验校核^[110]等。

在细长体高速出水时,其肩部或底部会出现相对背景压力的负压现象,负压在 SPH 数值计算中会导致强烈的张力不稳定。通过建立张力不稳定性控制理论(tensile instability control, TIC)可避免细长体出水过程的非物理性数值空洞^[5],而且,还可通过多级粒子分辨率技术对细长体附近区域的粒子进行加密,提高局部区域的精度。图 12 给出了细长体高速出水过程的初步模拟结果。由图可见,对于高速出水问题研究,SPH 方法已具备较强的预报能力。

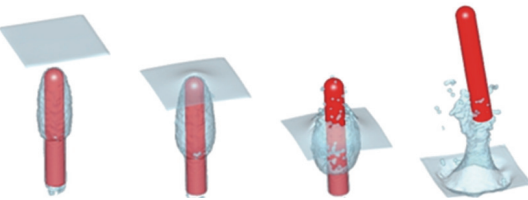


图 12 SPH 方法模拟的细长体高速出水过程
Fig. 12 Numerical simulation of high-speed water exit process of a slender body by SPH method

细长体从空中入水的瞬态过程中砰击载荷占主导地位,计算过程一般忽略黏性力,但因出水过程涉及了空化、湍流、强可压过程,通常受黏性

严重影响,所以出水与入水并非是完全逆向过程^[8]。Zhang 和 Sun 等^[8]采用 δ^+ -SPH 方法研究二维圆柱体出水过程,使用 TIC 技术成功模拟了圆柱体底部产生的涡旋分离,所得结果比边界元法(BEM)更精准。

高速出水问题还需要考虑细长体出水过程肩部产生的空泡,这就需要开发 SPH 理论框架下的空化模型,精确预报空泡的产生、演化和溃灭过程。空化问题具有强可压特性,Sun 等^[111]提出的体积自适应粒子撕裂与融合理论和技术在应对强可压的问题时具有较强的适用性,能够为开发 SPH 空化模型提供基础支撑。然而,目前传统的计算流体力学(CFD)算法模拟空化相变的相关技术^[112]暂时难以直接拓展应用到 SPH 算法中,亟需在未来研究中重点开展此项工作。

4 水下爆炸与结构毁伤

水下爆炸是一个涉及高温高压爆炸产物剧烈膨胀的强非线性过程^[19],爆炸过程分别与船体结构和海况相关,研究极具挑战性,难以通过单纯的理论和试验方法开展研究,而数值模拟是实现实尺度预报的最佳策略之一。

从目前来看,远场水下爆炸载荷的预报理论相对完善,但近场和超近场水下爆炸载荷预报仍十分困难。SPH 方法模拟水下爆炸问题时,可自动捕捉多相界面,模拟从起爆、冲击波传播到气泡膨胀的全过程。当 SPH 算法与结构求解器进行耦合时,可计算船体从损毁到沉没的全过程^[6,113]。本节将对 SPH 理论和方法在研究水下爆炸冲击波和气泡脉动方面取得的进展进行综述。

4.1 水下爆炸冲击波模拟

炸药在水下引爆后会产生高温高压的爆炸产物,辐射的高热量使附近的水瞬时汽化,形成高温高压气泡,并向外辐射形成冲击波。水下爆炸中冲击波的威力占据了总能量的一半左右。爆炸后产生的瞬态冲击波在多相中的传播,具有强可压、强非线性等特征,这对 SPH 算法的精确性和稳定性要求极高。而以往的 SPH 理论和方法基于不可压缩^[59]或弱可压假设^[49],难以直接应用于水下爆炸这类强压缩性问题,尤其是对水下爆炸气泡的周期性膨胀和收缩过程难以精准模拟。

Riemann SPH 方法的出现推动了粒子方法处理可压缩问题的应用发展,但早期在捕捉激波时的精度不如成熟的网格法,在理论方面还需进一步提高。因此,基于传统 SPH 理论,借鉴和引入

网格法中处理可压缩流动的先进数值技术及高精度计算框架,Meng 和 Zhang 等^[75]提出的 TENO-SPH 模型与方法,在冲击波捕捉和分辨方面具备了较高的数值精度和计算能力,增强了 Riemann SPH 方法处理此类问题的鲁棒性。Sun 等^[111]针对强可压问题的数值特征,提出一种新型的粒子体积自适应理论,实现了粒子在膨胀作用下撕裂和收缩时的融合模拟,较准确地预报了冲击波载荷。但是,对于气体膨胀压缩导致的核函数影响域内粒子数的变化问题,通常还需采用变光滑长度技术^[114],来提高 SPH 方法的计算精度和稳定性。

在水下爆炸的具体计算中,SPH 相关处理技术和方法取得了可观的进展。Wang 和 Zhang 等^[58]提出基于特征线原理的无反射边界条件,有效消除了水下爆炸冲击波计算中的边界反射,为 SPH 方法用于高精度模拟水下爆炸提供了依据。彭玉祥^[115]采用 SPH 方法模拟文献^[116]中相同工况下的二维近平面固壁柱状水下爆炸算例,研究了高压气泡产生的冲击波和稀疏波的传播,求解的压力结果与参考结果高度吻合,为 SPH 方法用于模拟强可压瞬态流动的可行性和有效性提供了参考。同时,文献^[115]针对三维自由场的水下爆炸问题进行模拟,将计算得到的冲击波压力时历曲线与经验公式进行了对比,两者吻合较好,体现了 SPH 方法预报冲击波压力的良好精度。

在计算三维轴对称水下爆炸问题时,还可以通过轴对称 SPH 数值模型^[117-119]进行模拟,以减小计算量。图 13 给出了采用轴对称 SPH 方法计算得到的水下爆炸几个典型时刻的冲击波压力云图。轴对称 SPH 方法的计算量小,相对于直接三维模拟,可采用更加精细的粒子分辨率,因而计算得到的冲击波波阵面十分锐利。由图可见,SPH 方法模拟水下爆炸冲击波阶段已发展得相当成熟可靠,具备了水下爆炸冲击波阶段载荷的精确预报能力。

4.2 水下爆炸气泡模拟

May 和 Monaghan^[120]最早采用 SPH 方法研究了气泡引起的舰船沉没过程。在此研究领域,文献^[10]主要考虑的是巨大的上浮气泡,而事实上更不可忽视的是水下爆炸气泡及其在舰船附近脉动激起的鞭状运动和射流对结构的冲击效应。研究水下爆炸产生的大尺度脉动气泡,需考虑环境中的静水压力、大气压力、重力及边界等的耦合作用,以及气泡脉动产生的热交换和能量耗散,此机理十分复杂。在上述方面,前人提出了理

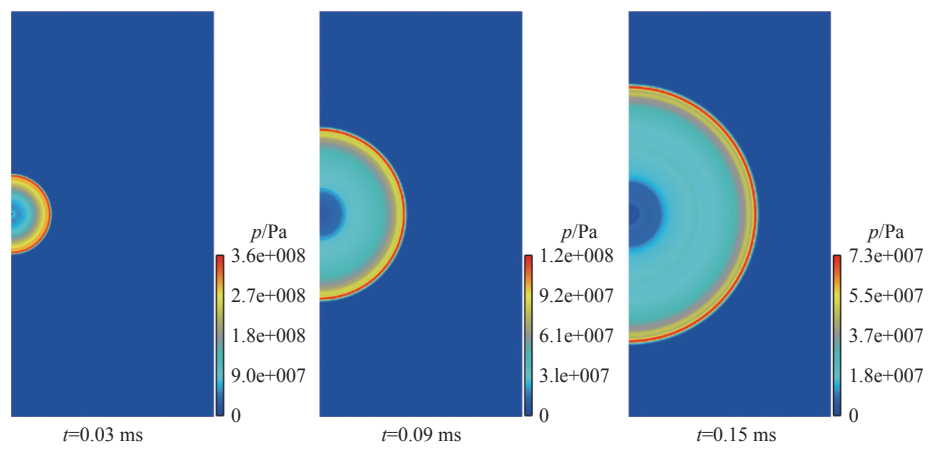


图 13 轴对称 SPH 方法模拟的水下爆炸几个典型时刻的冲击波压力云图

Fig. 13 Pressure contours of the shock wave induced by underwater explosion at typical time instant by axisymmetric SPH model

论、试验和计算等多种方法进行研究,取得了丰硕成果^[7, 121]。

SPH 方法尽管在处理大变形和动边界问题时具有明显优势,但用于模拟水下爆炸气泡脉动较为少见,其主要原因是,爆炸气泡涉及了爆炸气体的强压缩和膨胀过程,给粒子法模拟带来了挑战。Joshi 等^[122]对固体边界的空泡崩塌进行了模拟,然而忽略了气体粒子以及气泡的膨胀过程;Pineda 等^[123]也进行了多相模型模拟空泡崩塌,但因缺乏粒子体积自适应技术,气体粒子体积被过度压缩,导致水-气界面出现了明显的锯齿状。总之,水下爆炸气泡 SPH 模拟的难点主要体现在气泡脉动过程中。SPH 理论的拉格朗日粒子特性决定了气体粒子分布会随气泡体积大幅度变化。为简化问题的复杂性,目前,SPH 方法暂未计入气泡脉动过程中的热力学效应和能量损失,首要任务是提出、验证和优化适用于强可压问题的 SPH 理论,以增强 SPH 方法模拟气泡脉动的可行性,提高对气泡脉动和射流的仿真精度。

采用 SPH 方法计算爆炸气泡时,粒子不仅会因气泡膨胀变得十分稀疏,也会因气泡收缩而变得十分稠密,使得计算的载荷结果不准确^[111]。如图 14 所示,当气泡体积收缩至最小时(见图 14 左侧),气体粒子严重集聚,核函数半径范围内粒子数量急剧增多;相反,当气泡体积膨胀到最大时,气泡粒子的间距随之增大,核函数半径范围内粒子数量急剧减少(见图 14 右侧)。以上气泡收缩和膨胀过程中,核函数内部粒子数量大幅变化,但气泡外围的水粒子间距几乎不变(水的压缩性较小所导致)。由此,造成水-气界面的两侧粒子分布极不均衡,使得水-气界面不光顺,计算精度剧烈下降甚至计算中断。为解决 SPH 方法模拟空泡脉动时气体粒子的体积和间距剧烈变化所带来的计算精度及稳定性问题,Sun 等^[111]建立了基

于 SPH 体积自适应理论(volume adaptive scheme, VAS)的粒子撕裂-融合技术,成功模拟了水下爆炸气泡在自由场、自由液面、壁面等边界下的脉动过程。

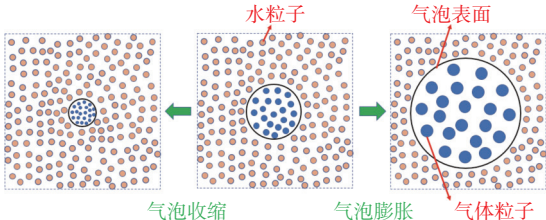
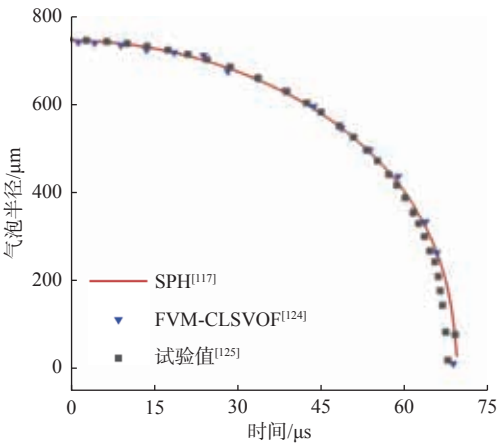


图 14 气泡脉动时气体粒子体积和间距变化示意图

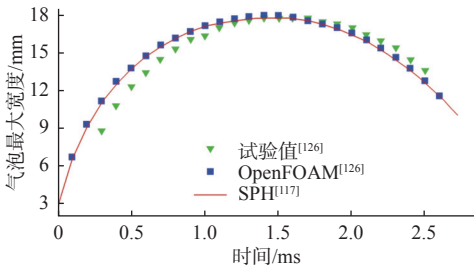
Fig. 14 Variation of the volume and spacing of gas particles during the pulsation of a bubble

尽管 SPH 理论和方法拥有精确捕捉大变形水-气界面的优势,但在处理三维气泡脉动问题时,因需要较大的计算域以避免边界影响而使得计算量较大、效率较低。为此,Sun 等^[117]构建了轴对称强可压多相流 SPH 模型,实现了 SPH 方法对水下爆炸气泡脉动的模拟,可精确捕捉高压气泡的膨胀、收缩、崩塌、射流等过程。图 15 给出了自由场溃灭气泡半径演化和自由液面附近气泡膨胀及收缩时最大宽度演化的 SPH 模拟结果与参考数据^[124-126]的对比验证^[117]。由图可见,轴对称 SPH 方法能准确预报不同条件下气泡的膨胀和收缩动态过程。

本文采用 Sun 等^[117]的轴对称 SPH 方法,模拟了 Tian 等^[127]给出的自由液面以下 10 m 处 500 kg 装药所产生的水下爆炸气泡脉动和射流过程,如图 16 所示。结果表明,计算得到的气泡膨胀和射流过程与 Tian 等^[127]提供的数值结果十分吻合。从数值模拟结果可以看出,基于 Sun 等^[111]提出的 VAS 理论,采用粒子撕裂-融合技术,SPH 算法可用于模拟水下爆炸冲击波和气泡脉动的全过程。最近,Fang 等^[119]将 VAS 理论与 Riemann SPH 方



(a) 自由场溃灭气泡半径演化



(b) 自由面附近爆炸气泡膨胀和收缩过程中最大宽度演化

图 15 水下爆炸气泡脉动的模拟 SPH 模拟与验证^[117]

Fig. 15 SPH simulation and validation of bubble pulsation in underwater explosion^[117]

法结合应用于激波及入水问题,也取得了较好的计算精度,验证了 SPH 理论和方法应用于水下爆炸及气泡动力学的可行性及有效性,为进一步深入研究水下爆炸力学和载荷机理提供了更多元的求解方案。

4.3 水下爆炸结构毁伤模拟

如上所述,SPH 方法因其不依赖网格,极为适合用于模拟大变形流-固耦合问题。早在 1991 年,Libersky 等^[128]就将 SPH 方法应用到了固体结构的

冲击碰撞断裂的研究中,将 SPH 方法的应用领域拓宽到了固体力学领域。早期运用 SPH 方法研究固体断裂时都采用三维实体对结构进行建模,但考虑到汽车、飞机和舰船等工程结构中广泛采用的是薄壳结构,采用三维实体建模会导致壳体厚度方向的粒子间距极小,从而限制时间积分的增量,使得计算效率降低。在 2008 年,Maurel 等^[129]提出了 SPH 壳单元理论,解决了时间增量受壳体厚度限制的缺点,极大提高了 SPH 方法在薄壳结构动响应方面的求解能力。此后,Caleyron 等^[130]又将该理论应用到了对薄壳结构冲击断裂响应的模拟中。同时,Ming 等^[131]应用并发展了该理论,将该理论命名为光滑粒子壳单元(smoothed particle shell,SPS),并应用到了水下爆炸结构毁伤的模拟中^[132]。

然而,因 SPH 理论和方法采用的是强形式的控制方程,经过使用移动最小二乘法(moving least squares,MLS)形函数修正其核函数后,使之不能自动满足结构自由边界条件,需要人工施加自由边界条件^[133-134],增加了断裂自由边模拟的复杂度。针对此问题,Peng 等^[135-136]采用重构核粒子方法(reproducing kernel particle method,RKPM)建立了任意曲壳曲梁三维无网格法的计算模型,实现了加筋壳结构的无网格模拟。而且,在上述基础上,建立了水下爆炸结构毁伤的流-固耦合计算模型^[113],分别采用 SPH 和 RKPM 方法求解水下爆炸载荷和舰船结构的断裂响应,并与试验结果进行对比,验证了所提计算模型的有效性和计算精度。图 17 给出了水下爆炸时舰船结构断裂毁伤的 SPH-RKPM 数值仿真结果。由图可见,该数值计算模型具备了预报水下爆炸时的舰船毁伤能力。目前,张阿漫教授团队建立了 SPH-RKPM 流-

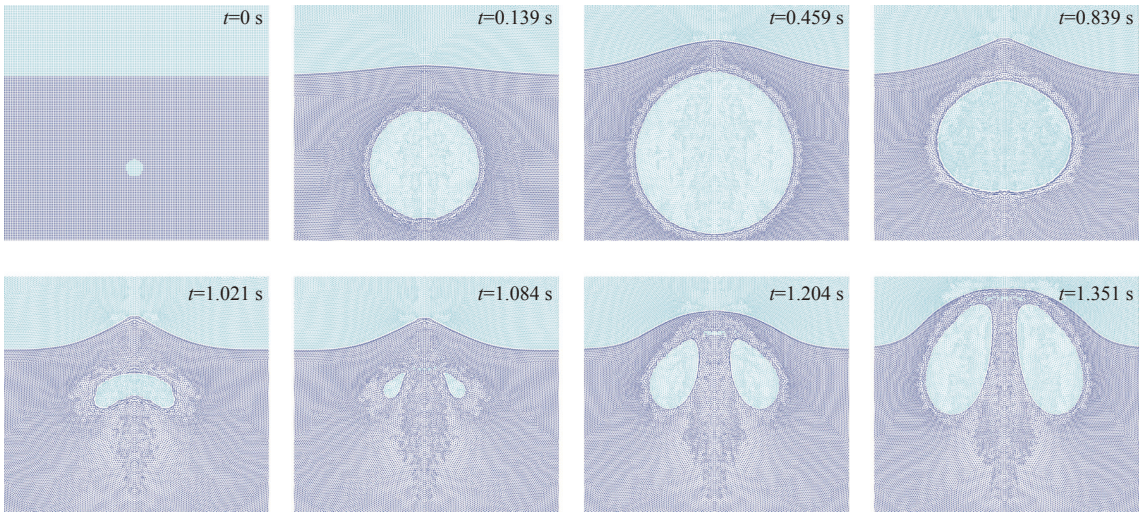


图 16 自由液面附近水下爆炸气泡脉动和射流的 SPH 模拟

Fig. 16 SPH simulations of bubble pulsation and jetting near a free surface

固耦合动力学模型及计算方法,开发了具有自主知识产权的水下爆炸舰船毁伤数值计算 FSLAB 软件^[6],该软件被应用到了舰船结构强冲击毁伤的模拟之中,广泛论证了 SPH-RKPM 耦合计算方法在水下爆炸领域的应用前景,能够为舰船防护结构设计提供理论依据和基础性技术支撑。

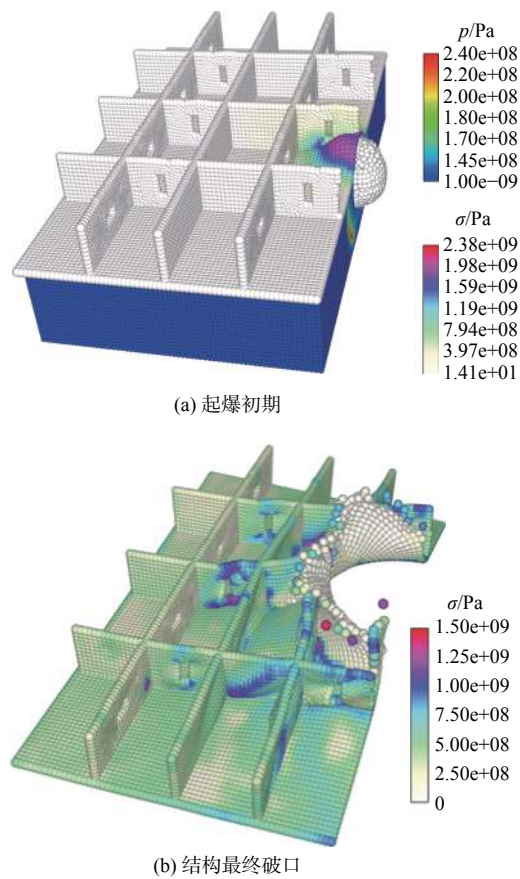


图 17 SPH-RKPM 算法模拟水下爆炸引起的舰船结构毁伤过程
Fig. 17 Numerical simulations of structural damage resulted from underwater explosion simulated by SPH-RKPM method

4.4 破舱涌流与结构动态沉没模拟

SPH 理论和方法除了能够精确预报船体在冲击载荷作用下的结构破损外,对破舱涌流和结构沉没的模拟也具有强适用性。在船体结构破损情况下,涌流灌入破口后与波浪的相互耦合作用,会使船体产生剧烈的横摇、升沉等多自由度的复杂运动。Guo 等^[137]采用三维 SPH 方法对静水中不同破口位置的破舱动态沉没过程进行了仿真,通过相关试验验证了 SPH 方法的精度和稳定性,为破舱动态沉没问题提供了基准算例,其舷侧破口涌流的仿真结果与试验结果对比如图 18(a)所示。Cheng 等^[138]、Ming 等^[139]和 Cao 等^[140]构造了 SPH 数值水池,对多水密舱体在波浪耦合作用下的沉没过程进行研究,准确模拟了舱内涌流晃动和外部波浪的耦合过程,进一步完善了破损结构

在波浪环境下的动态沉没力学机理,如图 18(b)所示的沉没过程^[138]。综上,建议未来考虑舱内气体的真实压缩性,基于 VAS 框架的多级粒子分辨率技术和多相流模型^[141],进一步开发适用于破舱涌流的高精度 SPH 理论和方法,以提高模拟精度和稳定性。SPH 方法用于水下爆炸的各环节及船体破口与动态沉没过程均具有较强的数值模拟能力,预期未来能够实现将 SPH 方法应用到水下爆炸全过程的精准仿真。

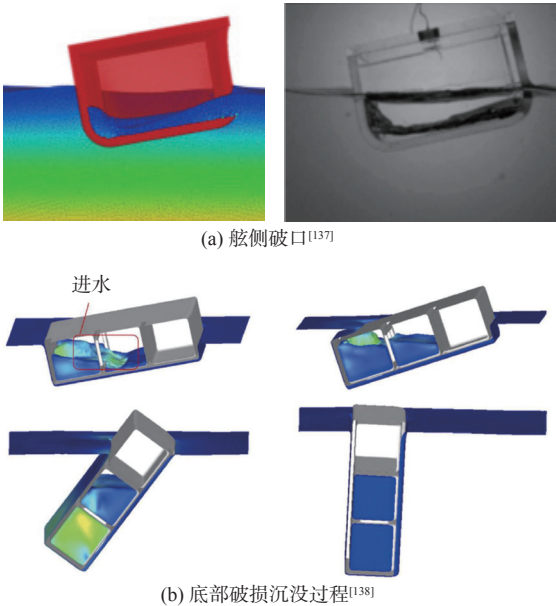


图 18 三维 SPH 方法模拟破损舱段涌流和沉没过程的结果与试验结果对比

Fig. 18 Comparison between experimental and 3D SPH simulation results of flowing and sinking process due to a damaged ship cabin

5 高速水动力学耦合算法

考虑到 SPH 数值模拟在实际工程应用中难以规避计算成本的问题,为充分发挥 SPH 模拟大变形问题的优势,提高其在船海力学领域的应用范围,建议 SPH 方法在未来发展上应重视与其他算法的耦合。例如,开发有/无网格耦合算法、黏流-势流耦合算法等,构建如图 19 所示的耦合计算框架,以解决船海高速水动力领域常见的出水入水以及水下爆炸与冲击问题。图 19 所示的耦合算法可在流-固耦合作用剧烈的区域采用 SPH 粒子法进行局部范围的精准计算,在较小变形的外围区域使用黏流网格法进行高效求解,在远场区域可采用势流方法进行大范围海域的模拟。事实上,文献^[142]中的部分耦合算法已为该框架的搭建和实现奠定了坚实的技术基础,例如,SPH-FVM 算法^[143]在大变形流动仿真上拥有较好的稳定性,已拓展应用至航行体的兴波、高

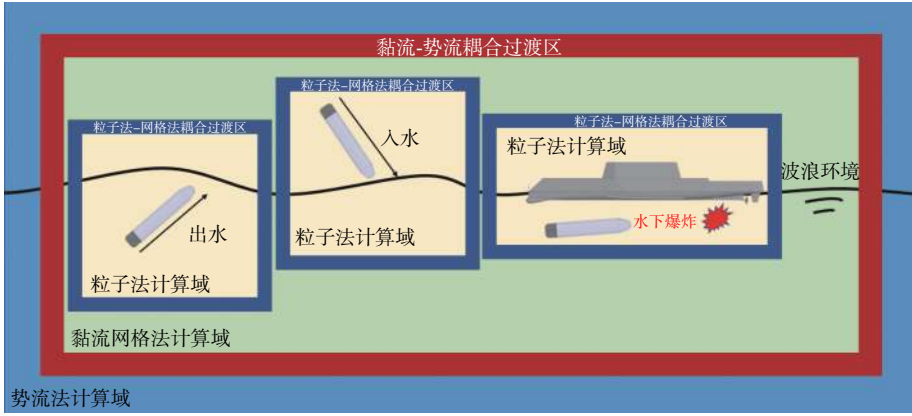


图 19 有/无网格耦合算法和黏流-势流耦合算法求解典型高速水动力问题示意图

Fig. 19 Schematics of coupled algorithm between mesh-based and particle-based methods and between viscous-flow and potential-flow solvers for typical high-speed hydrodynamic problems

速入水等问题。此外，高阶谱 (higher-order spectral, HOS) 方法与网格法求解器的耦合也得到了验证^[144]，其适合用于对大范围海域内的船海水动力问题进行黏流-势流耦合计算。图 19 所示的多算法耦合计算框架通过结合有网格、无网格和黏流、势流数值算法的优点进行耦合求解，有望为 SPH 理论和方法应用于实际船海工程问题提供新的技术方案，为实现高精度、高效率的船海工程应用仿真奠定基础。

6 结 语

本文综述了 SPH 理论与方法在船海高速水动力学研究中的最新进展。可见，SPH 理论和方法日趋得到完善，相关数值方法在高速舰船兴波、细长体出水和入水、水下爆炸与冲击等高速水动力问题中已得到广泛应用，取得了较高的计算精度，在精确捕捉大变形的多相界面和流-固界面等方面具备明显优势。

在未来研究中，SPH 理论与方法在以下几个方面仍有提高的空间，主要包括：

- 1) 在计算精度和效率方面，进一步提高 SPH 理论和方法的完备性及数值格式的收敛阶数，实现以较少粒子数量达到预期的计算精度，提高计算效率。
- 2) 在边界处理方面，仍需进一步发展三维复杂构型壁面边界的 SPH 数值处理技术，减弱边界效应对物理问题模拟结果的影响。
- 3) 在应用范围和领域方面，开发 SPH 理论框架下的湍流模型和空化模型，加强高雷诺数流动和相变问题的模拟能力。同时，发展基于体积分数的 SPH 水气混合物的理论和数值模型，进一步拓展应用于高速航行体的兴波和水汽泡混合流模拟中。

4) 在实际工程问题方面，进一步提高 SPH 方法和计算程序的高性能并行计算能力，与国产大型超级计算机的能力结合，实现亿级粒子数的大规模并行化模拟，增强 SPH 理论和方法的工程化应用能力。

7 致 谢

感谢哈尔滨工程大学明付仁副教授、王平平博士和中国海洋大学程晗博士对本文水下爆炸冲击波和细长体出入水计算提供的帮助。

参考文献：

[1] ZHANG Z R, LIU H, ZHU S P, et al. Application of CFD in ship engineering design practice and ship hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2006, 18(Supp 3): 315-322.

[2] 王建华, 万德成. CFD 数值模拟船舶在波浪中的回转操纵运动 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1): 1-8.

WANG J H, WAN D C. CFD simulation of ship turning motion in waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(1): 1-8 (in Chinese).

[3] 刘鑫旺, 万德成. 豪华邮轮多航速兴波阻力的船型优化 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 1-10,40.

LIU X W, WAN D C. Hull form optimization of wave-making resistance in different speeds for a luxury cruise ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 1-10,40 (in Chinese).

[4] MARRONE S, COLAGROSSI A, ANTUONO M, et al. A 2D+*t* SPH model to study the breaking wave pattern generated by fast ships[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(8): 1199-1215.

[5] LYU H G, SUN P N, HUANG X T, et al. On removing the numerical instability induced by negative pressures in SPH simulations of typical fluid-structure interaction problems in ocean engineering[J]. Applied Ocean Research, 2021, 117: 102938.

- [6] 彭玉祥, 张阿漫, 薛冰, 等. 强冲击作用下舰船结构毁伤的三维无网格 SPH-RKPM 方法数值模拟 [J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2021, 51(12): 124614.
PENG Y X, ZHANG A M, XUE B, et al. Numerical investigation of ship structure damage subject to strong impact using a 3D meshless SPH-RKPM method[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(12): 124614 (in Chinese).
- [7] 张阿漫, 王诗平, 彭玉祥, 等. 水下爆炸与舰船毁伤研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 1–13.
ZHANG A M, WANG S P, PENG Y X, et al. Research progress in underwater explosion and its damage to ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(3): 1–13 (in Chinese).
- [8] ZHANG A M, SUN P N, MING F R, et al. Smoothed particle hydrodynamics and its applications in fluid-structure interactions[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2017, 29(2): 187–216.
- [9] YE T, PAN D Y, HUANG C, et al. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for complex fluid flows: Recent developments in methodology and applications[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(1): 011301.
- [10] GÓMEZ-GESTEIRA M, CERQUEIRO D, CRESPO C, et al. Green water overtopping analyzed with a SPH model[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(2): 223–238.
- [11] 于汉, 李清, 杨德庆. 水面舰船粘性流动和流噪声的数值计算 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(6): 22–29.
YU H, LI Q, YANG D Q. Numerical simulation of viscous flow and hydrodynamic noise in surface ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 22–29 (in Chinese).
- [12] WANG B L, GUO X Y, LIU H, et al. Numerical simulations of wake signatures around high-speed ships[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2015, 26(6): 986–989.
- [13] REED A M, MILGRAM J H. Ship wakes and their radar images[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 34(1): 469–502.
- [14] CHEN C, ZHANG A M, CHEN J Q, et al. SPH simulations of water entry problems using an improved boundary treatment[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109679.
- [15] SUN P N, MING F R, ZHANG A M. Numerical simulation of interactions between free surface and rigid body using a robust SPH method[J]. Ocean Engineering, 2015, 98: 32–49.
- [16] 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.
WANG Y H, SHI X H. Review on research and development of water-entry impact problem[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(3): 276–282 (in Chinese).
- [17] LYU H G, DENG R, SUN P N, et al. Study on the wedge penetrating fluid interfaces characterized by different density-ratios: Numerical investigations with a multi-phase SPH model[J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109538.
- [18] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 148–153.
ZHANG S R, KONG Y, WANG G H. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13): 148–153 (in Chinese).
- [19] 张阿漫, 王诗平, 汪玉, 等. 水下爆炸对舰船结构损伤特征研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2011, 6(3): 1–7.
ZHANG A M, WANG S P, WANG Y, et al. Advances in the research of characteristics of warship structural damage due to underwater explosion[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(3): 1–7 (in Chinese).
- [20] VON KARMAN T H. The impact on seaplane floats during landing[J]. National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.
- [21] WANG S P, ZHANG A M, LIU Y L, et al. Bubble dynamics and its applications[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(6): 975–991.
- [22] MARRONE S, BOUSCASSE B, COLAGROSSI A, et al. Study of ship wave breaking patterns using 3D parallel SPH simulations[J]. Computers & Fluids, 2012, 69: 54–66.
- [23] LANDRINI M, COLAGROSSI A, GRECO M, et al. The fluid mechanics of splashing bow waves on ships: A hybrid BEM-SPH analysis[J]. Ocean Engineering, 2012, 53: 111–127.
- [24] 孙鹏楠. 物体与自由液面耦合作用的光滑粒子流体动力学方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
SUN P N. Study on SPH method for the simulation of object-free surface interactions[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018 (in Chinese).
- [25] LIU M B, LI S M. On the modeling of viscous incompressible flows with smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(5): 731–745.
- [26] 陈亚东, 陆凡, 孙华圣, 等. 基于离散单元法的抗拔桩承载特性研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 200–204.
CHEN Y D, LU F, SUN H S, et al. Study on bearing behavior of uplift pile based on discrete element method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9): 200–204 (in Chinese).
- [27] 郑温刚, 王媛, 张云云, 等. 基于 SPH 方法的阶梯式溢洪道消能特性研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 117–124.
ZHENG W G, WANG Y, ZHANG Y Y, et al. SPH

- method-based study on energy dissipation characteristics of stepped spillway[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(12): 117–124 (in Chinese).
- [28] 顾声龙, 吴玉帅, 解宏伟, 等. 基于 CSPM 方法对二维管嘴出流的数值模拟 [J]. *水利水电技术*, 2016, 47(9): 39–43.
- GU S L, WU Y S, XIE H W, et al. CSPM method-based numerical simulation on outflow from 2-D pipe nozzle[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(9): 39–43 (in Chinese).
- [29] 马理强, 刘谋斌, 常建忠, 等. 液滴冲击液膜问题的光滑粒子动力学模拟 [J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 244701.
- MA L Q, LIU M B, CHANG J Z, et al. Numerical simulation of droplet impact onto liquid films with smoothed particle hydrodynamics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 244701 (in Chinese).
- [30] 田鑫, 万德成. MPS 方法模拟三维圆柱形液舱晃荡问题 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(3): 116–121.
- TIAN X, WAN D C. Simulation of sloshing in three-dimensional cylindrical tank by MPS method[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(3): 116–121 (in Chinese).
- [31] HASHIMOTO H, GRENIER N, SUEYOSHI M, et al. Comparison of MPS and SPH methods for solving forced motion ship flooding problems[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 118: 103001.
- [32] ABDELRAZEK A M, KIMURA I, SHMIZU Y. Comparison between SPH and MPS methods for numerical simulations of free surface flow problems[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 2014, 70(4): I_67–I_72.
- [33] BAKTI F P, KIM M H, KIM K S, et al. Comparative study of standard WC-SPH and MPS solvers for free surface academic problems[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2016, 26(3): 235–243.
- [34] ZHANG Y X, WAN D C. Comparison investigations of numerical simulations of incompressible viscous flows by SPH and MPS[C]//ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China: ASME, 2010: 837–845.
- [35] 陈翔, 万德成. MPS 与 GPU 结合数值模拟 LNG 液舱晃荡 [J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 714–729.
- CHEN X, WAN D C. Numerical simulation of liquid sloshing in LNG tank using GPU-accelerated MPS method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 714–729 (in Chinese).
- [36] 陈翔, 张友林, 万德成. MPS 方法研究进展及其在船舶水动力学问题中的应用 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(6): 955–972.
- CHEN X, ZHANG Y L, WAN D C. Developments of the MPS method and its applications on hydrodynamics problems[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(6): 955–972 (in Chinese).
- [37] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展 [J]. *力学进展*, 2003, 33(2): 251–260.
- XU Y, SUN Q C, ZHANG L, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(2): 251–260 (in Chinese).
- [38] SUN X S, SAKAI M, YAMADA Y. Three-dimensional simulation of a solid-liquid flow by the DEM-SPH method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2013, 248: 147–176.
- [39] ROBB D M, GASKIN S J, MARONGIU J C. SPH-DEM model for free-surface flows containing solids applied to river ice jams[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2016, 54(1): 27–40.
- [40] KLOSS C, GONIVA C, HAGER A, et al. Models, algorithms and validation for open source DEM and CFD-DEM[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2012, 12(2/3): 140–152.
- [41] 王哲, 邓迪, 万德成. 基于 CFD 方法的变张力柔性圆柱涡激振动数值模拟 [J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2019, 34(2): 201–209.
- WANG Z, DENG D, WAN D C. Numerical simulations of vortex-induced vibrations of flexible cylinder with varying tensions based on CFD method[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 2019, 34(2): 201–209 (in Chinese).
- [42] 余安正, 万德成. 高航速下 KCS 模型艏波破碎与艏部涡量数值研究 [J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2020, 35(1): 122–132.
- YU A Z, WAN D C. Numerical study of bow wave breaking and vorticity of KCS under high speeds[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 2020, 35(1): 122–132 (in Chinese).
- [43] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 191(2): 448–475.
- [44] SUN P N, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. Multi-resolution Delta-plus-SPH with tensile instability control: Towards high Reynolds number flows[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 224: 63–80.
- [45] CRESPO A C, DOMINGUEZ J M, BARREIRO A, et al. GPUs, a new tool of acceleration in CFD: efficiency and reliability on smoothed particle hydrodynamics methods[J]. *PLoS One*, 2011, 6(6): e20685.
- [46] ZHANG Z F, WANG C, ZHANG A M, et al. SPH-BEM simulation of underwater explosion and bubble dynamics near rigid wall[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(7): 1082–1093.

- [47] GROENENBOOM P, CARTWRIGHT B, MCGUCKIN D. Recent features and industrial applications of the hybrid SPH-FE method[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2021, 35(1/2): 106–128.
- [48] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 181(3): 375–389.
- [49] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 110(2): 399–406.
- [50] NGUYEN V T, VU D T, PARK W G, et al. Navier-Stokes solver for water entry bodies with moving Chimera grid method in 6DOF motions[J]. *Computers & Fluids*, 2016, 140: 19–38.
- [51] SUN P N, ZHANG A M, MARRONE S, et al. An accurate and efficient SPH modeling of the water entry of circular cylinders[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 72: 60–75.
- [52] CHENG H, MING F R, SUN P N, et al. Towards the modeling of the ditching of a ground-effect wing ship within the framework of the SPH method[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82: 370–384.
- [53] LUO M, KHAYYER A, LIN P Z. Particle methods in ocean and coastal engineering[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102734.
- [54] LIU M B, LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2010, 17(1): 25–76.
- [55] COLAGROSSI A, ANTUONO M, LE TOUZÉ D. Theoretical considerations on the free-surface role in the smoothed-particle-hydrodynamics model[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(5): 056701.
- [56] MARRONE S, ANTUONO M, COLAGROSSI A, et al. δ -SPH model for simulating violent impact flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(13/14/15/16): 1526–1542.
- [57] FEDERICO I, MARRONE S, COLAGROSSI A, et al. Simulating 2D open-channel flows through an SPH model[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2012, 34: 35–46.
- [58] WANG P P, ZHANG A M, MING F R, et al. A novel non-reflecting boundary condition for fluid dynamics solved by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 860: 81–114.
- [59] CUMMINS S J, RUDMAN M. An SPH projection method[J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 152(2): 584–607.
- [60] CHOW A D, ROGERS B D, LIND S J, et al. Incompressible SPH (ISPH) with fast Poisson solver on a GPU[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 226: 81–103.
- [61] CHOW A D, ROGERS B D, LIND S J, et al. Numerical wave basin using incompressible smoothed particle hydrodynamics (ISPH) on a single GPU with vertical cylinder test cases[J]. *Computers & Fluids*, 2019, 179: 543–562.
- [62] CRESPO A J C, DOMÍNGUEZ J M, ROGERS B D, et al. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver based on smoothed particle Hydrodynamics (SPH)[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, 187: 204–216.
- [63] ZHANG C, REZAVAND M, ZHU Y J, et al. SPHinXsys: an open-source multi-physics and multi-resolution library based on smoothed particle hydrodynamics[J]. *Computer Physics Communications*, 2021, 267: 108066.
- [64] VILA J P. On particle weighted methods and smooth particle hydrodynamics[J]. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 1999, 9(2): 161–209.
- [65] ANTUONO M, COLAGROSSI A, MARRONE S. Numerical diffusive terms in weakly-compressible SPH schemes[J]. *Computer Physics Communications*, 2012, 183(12): 2570–2580.
- [66] ANTUONO M, SUN P N, MARRONE S, et al. The δ -ALE-SPH model: An arbitrary Lagrangian-Eulerian framework for the δ -SPH model with particle shifting technique[J]. *Computers & Fluids*, 2021, 216: 104806.
- [67] NESTOR R M, BASA M, LASTIWKA M, et al. Extension of the finite volume particle method to viscous flow[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(5): 1733–1749.
- [68] LIND S J, XU R, STANSBY P K, et al. Incompressible smoothed particle hydrodynamics for free-surface flows: A generalised diffusion-based algorithm for stability and validations for impulsive flows and propagating waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(4): 1499–1523.
- [69] SUN P N, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. The δ -plus-SPH model: Simple procedures for a further improvement of the SPH scheme[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, 315: 25–49.
- [70] SUN P N, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. A consistent approach to particle shifting in the δ -plus-SPH model[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 348: 912–934.
- [71] ZHANG G M, BATRA R C. Modified smoothed particle hydrodynamics method and its application to transient problems[J]. *Computational Mechanics*, 2004, 34(2): 137–146.
- [72] DILTS G A. Moving-least-squares-particle hydro-

- dynamics—I. Consistency and stability[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 44(8): 1115–1155.
- [73] LIU M B, XIE W P, LIU G R. Modeling incompressible flows using a finite particle method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, 29(12): 1252–1270.
- [74] WANG P P, ZHANG A M, MENG Z F, et al. A new type of WENO scheme in SPH for compressible flows with discontinuities[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 381: 113770.
- [75] MENG Z F, ZHANG A M, WANG P P, et al. A targeted essentially non-oscillatory (TEN0) SPH method and its applications in hydrodynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 243: 110100.
- [76] PURI K, RAMACHANDRAN P. Approximate Riemann solvers for the Godunov SPH (GSPH)[J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 270: 432–458.
- [77] COLAGROSSI A, SOUTO-IGLESIAS A, ANTUONO M, et al. Smoothed-particle-hydrodynamics modeling of dissipation mechanisms in gravity waves[J]. *Physical Review E*, 2013, 87(2): 023302.
- [78] ZHU Y J, ZHANG C, YU Y C, et al. A CAD-compatible body-fitted particle generator for arbitrarily complex geometry and its application to wave-structure interaction[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(2): 195–206.
- [79] ADAMI S, HU X Y, ADAMS N A. A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(21): 7057–7075.
- [80] CHENG H, MING F R, SUN P N, et al. Ship hull slamming analysis with smoothed particle hydrodynamics method[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102268.
- [81] DOMÍNGUEZ J M, FOURTAKAS G, ALTOMARE C, et al. DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2021: 1–29.
- [82] GAROOSI F, HOOMAN K. Numerical simulation of multiphase flows using an enhanced volume-of-fluid (VOF) method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 215: 106956.
- [83] DI MASCIO A, BROGLIA R, MUSCARI R. On the application of the single-phase level set method to naval hydrodynamic flows[J]. *Computers & Fluids*, 2007, 36(5): 868–886.
- [84] TAGLIAFIERRO B, MANCINI S, ROPERO-GIRALDA P, et al. Performance assessment of a planing hull using the smoothed particle hydrodynamics method[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 244.
- [85] VEEN D, GOURLAY T. A combined strip theory and smoothed particle hydrodynamics approach for estimating slamming loads on a ship in head seas[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 43: 64–71.
- [86] ANDRILLON Y, ALESSANDRINI B. A 2D+T VOF fully coupled formulation for the calculation of breaking free-surface flow[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2004, 8(4): 159–168.
- [87] MINTU S, MOLYNEUX D, COLBOURNE B. Full-scale SPH simulations of ship-wave impact generated sea spray[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 241: 110077.
- [88] MONAGHAN J J, KOCHARYAN A. SPH simulation of multi-phase flow[J]. *Computer Physics Communications*, 1995, 87(1/2): 225–235.
- [89] FONTY T, FERRAND M, LEROY A, et al. Mixture model for two-phase flows with high density ratios: a conservative and realizable SPH formulation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 111: 158–174.
- [90] FONTY T, FERRAND M, LEROY A, et al. Air entrainment modeling in the SPH method: a two-phase mixture formulation with open boundaries[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2020, 105(4): 1149–1195.
- [91] ALTOMARE C, DOMÍNGUEZ J M, CRESPO A J C, et al. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 127: 37–54.
- [92] HE M, KHAYYER A, GAO X F, et al. Theoretical method for generating solitary waves using plunger-type wavemakers and its smoothed particle hydrodynamics validation[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102414.
- [93] ANTUONO M, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. Propagation of gravity waves through an SPH scheme with numerical diffusive terms[J]. *Computer Physics Communications*, 2011, 182(4): 866–877.
- [94] SUN P N, LUO M, LE TOUZÉ D, et al. The suction effect during freak wave slamming on a fixed platform deck: smoothed particle hydrodynamics simulation and experimental study[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(11): 117108.
- [95] REN B, WEN H J, DONG P, et al. Numerical simulation of wave interaction with porous structures using an improved smoothed particle hydrodynamic method[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 88–100.
- [96] REN B, HE M, DONG P, et al. Nonlinear simulations of wave-induced motions of a freely floating body using WSPH method[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 50: 1–12.
- [97] SHAO S D, JI C M, GRAHAM D I, et al. Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(9): 723–735.
- [98] 段文洋, 王瑞峰, 马山, 等. 规则波中船舶甲板上浪模

型试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(10): 1209–1213,1260.

DUAN W Y, WANG R F, MA S, et al. Model test for green water of ships in regular waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(10): 1209–1213,1260 (in Chinese).

[99] LE TOUZÉ D, MARSH A, OGER G, et al. SPH simulation of green water and ship flooding scenarios[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5 Supp. 1): 231–236.

[100] AREU-RANGEL O S, HERNÁNDEZ-FONTES J V, SILVA R, et al. Green water loads using the wet dam-break method and SPH[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108392.

[101] ZHAO X Z, HU C H. Numerical and experimental study on a 2-D floating body under extreme wave conditions[J]. *Applied Ocean Research*, 2012, 35: 1–13.

[102] ZHAO X Z, YE Z T, FU Y N, et al. A CIP-based numerical simulation of freak wave impact on a floating body[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 87: 50–63.

[103] SUI Y T, ZHANG A M, MING F R, et al. Experimental investigation of oblique water entry of high-speed truncated cone projectiles: Cavity dynamics and impact load[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 104: 103305.

[104] GHAZANFARIAN J, SAGHATCHI R, GORJIBANDPY M. Turbulent fluid-structure interaction of water-entry/exit of a rotating circular cylinder using SPH method[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2015, 26(8): 1550088.

[105] ZHANG H S, ZHANG Z L, HE F, et al. Numerical investigation on the water entry of a 3D circular cylinder based on a GPU-accelerated SPH method[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2022, 94: 1–16.

[106] YANG Q Z, XU F, YANG Y, et al. Two-phase SPH model based on an improved Riemann solver for water entry problems[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 199: 107039.

[107] DI MASCIIO A, ANTUONO M, COLAGROSSI A, et al. Smoothed particle hydrodynamics method from a large eddy simulation perspective[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(3): 035102.

[108] 杨松. 基于 SPH 方法的回转体结构入水的瞬态流固耦合特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

YANG S. Transient fluid-solid interaction characteristics of the water entry of revolved body based on SPH method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020 (in Chinese).

[109] WU Q G, NI B Y, BAI X L, et al. Experimental study on large deformation of free surface during water exit of a sphere[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 369–376.

[110] CHU X S, YAN K, WANG Z, et al. Numerical simulation of water-exit of a cylinder with cavities[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(Supp.1): 877–881.

[111] SUN P N, LE TOUZÉ D, OGER G, et al. An accurate SPH volume adaptive scheme for modeling strongly-compressible multiphase flows. Part 1: numerical scheme and validations with basic 1D and 2D benchmarks[J]. *Journal of Computational Physics*, 2021, 426: 109937.

[112] 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望 [J]. 力学进展, 2019, 49(1): 428–479.

J I B, CHENG H Y, HUANG B, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(1): 428–479 (in Chinese).

[113] PENG Y X, ZHANG A M, MING F R. Numerical simulation of structural damage subjected to the near-field underwater explosion based on SPH and RKPM[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 222: 108576.

[114] BENZ W. Smooth particle hydrodynamics: a review[M]//BUCHLER J R. The numerical modelling of nonlinear stellar pulsations. Dordrecht: Springer, 1990: 269–288.

[115] 彭玉祥. 改进的无网格计算方法及其在结构流固耦合冲击毁伤中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

PENG Y X. Improved mesh free methods and its application in structural damage analysis under fluid-structure impact[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).

[116] XIE W F, LIU T G, KHOO B C. Application of a one-fluid model for large scale homogeneous unsteady cavitation: The modified Schmidt model[J]. Computers & Fluids, 2006, 35(10): 1177–1192.

[117] SUN P N, LE TOUZÉ D, OGER G, et al. An accurate SPH volume adaptive scheme for modeling strongly-compressible multiphase flows. Part 2: extension of the scheme to cylindrical coordinates and simulations of 3D axisymmetric problems with experimental validations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2021, 426: 109936.

[118] ZHANG A M, YANG W S, HUANG C, et al. Numerical simulation of column charge underwater explosion based on SPH and BEM combination[J]. Computers & Fluids, 2013, 71: 169–178.

[119] FANG X L, COLAGROSSI A, WANG P P, et al. An accurate and robust axisymmetric SPH method based on Riemann solver with applications in ocean engineering[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110369.

[120] MAY D A, MONAGHAN J J. Can a single bubble

- sink a ship?[J]. *American Journal of Physics*, 2003, 71(9): 842–849.
- [121] 王诗平. 水中结构物附近爆炸气泡运动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- WANG S P. Study on dynamics of underwater explosion bubbles near structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011 (in Chinese).
- [122] JOSHI S, FRANC J P, GHIGLIOTTI G, et al. SPH modelling of a cavitation bubble collapse near an elasto-visco-plastic material[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 125: 420–439.
- [123] PINEDA S, MARONGIU J C, AUBERT S, et al. Simulation of a gas bubble compression in water near a wall using the SPH-ALE method[J]. *Computers & Fluids*, 2019, 179: 459–475.
- [124] YIN J Y, ZHANG Y X, ZHANG Y N. Numerical study of a laser generated cavitation bubble based on FVM and CLSVOF method[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2019, 240(7): 072021.
- [125] MÜLLER S, BACHMANN M, KRÖNINGER D, et al. Comparison and validation of compressible flow simulations of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(9): 1850–1862.
- [126] LI T, ZHANG A M, WANG S P, et al. Bubble interactions and bursting behaviors near a free surface[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(4): 042104.
- [127] TIAN Z L, LIU Y L, ZHANG A M, et al. Analysis of breaking and re-closure of a bubble near a free surface based on the Eulerian finite element method[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 170: 41–52.
- [128] LIBERSKY L D, PETSCHKE A G. Smooth particle hydrodynamics with strength of materials[M]. *Advances in the free-Lagrange method including contributions on adaptive gridding and the smooth particle hydrodynamics method*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991: 248–257.
- [129] MAUREL B, COMBESURE A. A SPH shell formulation for plasticity and fracture analysis in explicit dynamics[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, 76(7): 949–971.
- [130] CALEYRON F, COMBESURE A, FAUCHER V, et al. Dynamic simulation of damage-fracture transition in smoothed particles hydrodynamics shells[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2012, 90(6): 707–738.
- [131] MING F R, ZHANG A M, WANG S P. Smoothed particle hydrodynamics for the linear and nonlinear analyses of elastoplastic damage and fracture of shell[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2015, 7(2): 1550032.
- [132] MING F R, ZHANG A M, XUE Y Z, et al. Damage characteristics of ship structures subjected to shock-waves of underwater contact explosions[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 117: 359–382.
- [133] CALEYRON F. Simulation numérique par la méthode SPH de fuites de fluide consécutives à la déchirure d'un réservoir sous impact[D]. Villeurbanne, France: INSA de Lyon, 2011.
- [134] HUANG Y H, ZHANG Z G, PENG Y X, et al. A three-dimensional beam formulation for large deformation and an accurate implementation of the free boundary[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2021, 134: 103736.
- [135] PENG Y X, ZHANG A M, MING F R. A thick shell model based on reproducing kernel particle method and its application in geometrically nonlinear analysis[J]. *Computational Mechanics*, 2018, 62(3): 309–321.
- [136] PENG Y X, ZHANG A M, LI S F, et al. A beam formulation based on RKPM for the dynamic analysis of stiffened shell structures[J]. *Computational Mechanics*, 2019, 63(1): 35–48.
- [137] GUO K, SUN P N, CAO X Y, et al. A 3-D SPH model for simulating water flooding of a damaged floating structure[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2017, 29(5): 831–844.
- [138] CHENG H, ZHANG A M, MING F R. Study on coupled dynamics of ship and flooding water based on experimental and SPH methods[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(10): 107101.
- [139] MING F R, ZHANG A M, CHENG H, et al. Numerical simulation of a damaged ship cabin flooding in transversal waves with smoothed particle hydrodynamics method[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 165: 336–352.
- [140] CAO X Y, TAO L B, ZHANG A M, et al. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) model for coupled analysis of a damaged ship with internal sloshing in beam seas[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(3): 032103.
- [141] CAO X Y, MING F R, ZHANG A M, et al. Multi-phase SPH modelling of air effect on the dynamic flooding of a damaged cabin[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 163: 7–19.
- [142] HUANG C, ZHAO L, NIU J P, et al. Coupled particle and mesh method in an Euler frame for unsteady flows around the pitching airfoil[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2022, 138: 159–176.
- [143] MARRONE S, DI MASCIIO A, LE TOUZÉ D. Coupling of smoothed particle hydrodynamics with finite volume method for free-surface flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2016, 310: 161–180.
- [144] ZHUANG Y, WAN D C. Parametric study of a new HOS-CFD coupling method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(1): 43–54.