

# 气液相变两相流的 SPH 守恒一致耦合方法研究

**摘要：**气液界面流动-传热-相变耦合广泛存在于深冷换热、蒸发冷却与液滴蒸发等过程。界面拓扑快速演化、强温度梯度与潜热交换共同作用，呈现多尺度强非线性特征。传统网格法受界面重构复杂、潜热离散误差累积与时间步刚性等限制，难以在强耦合工况下兼顾精度与稳定性；现有无网格 SPH 研究多将两相耦合、相变闭合与粒子自适应分离处理，缺乏统一守恒约束，易引发界面压力振荡、能量漂移与参数敏感。为此，本项目开展气液相变两相流的 SPH 守恒一致耦合方法研究：①构建界面压力-速度信息传递的相容离散与稳定边界交换机制，抑制非物理振荡与相间掺混；②建立热通量驱动的相变质量通量闭合与潜热守恒更新方法，实现与耦合推进相容的能量交换；③面向液-气相变体积膨胀，发展守恒约束的粒子分裂/合并与多时间尺度推进，并与界面耦合、相变更新协同集成。本项目将通过由简到繁的典型算例逐级验证，形成稳定可靠、可复用的 SPH 耦合求解算法与实现流程，为航空航天热防护等深冷相变两相流模拟提供计算方法基础。

**关键词：**光滑粒子流体动力学（SPH）；无网格方法；气液相变两相流；守恒一致耦合；相变闭合

**Abstract:**

**Key words:**

# 报告正文（2026 版）

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。申请书正文原则上不超过 30 页，鼓励简洁表达。**请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。**

## （一）立项依据

（为什么要开展此项研究，研究的科学技术价值如何）

### 1. 研究背景及科学意义

流-热-相变耦合过程广泛存在于深冷换热、蒸发冷却、薄膜沸腾、喷雾冷却、液滴蒸发等典型界面传热现象中，是影响多相流动与能量传输的核心科学问题。耦合过程中，界面常发生剧烈拓扑演化，密度、粘度等物性参数可出现数个量级的突变；同时，相变潜热的快速释放或吸收进一步诱导强烈的温度梯度和显著能量输运，并驱动非平衡条件下复杂的界面动力学行为。这类多场相互作用现象在航空航天热防护、深冷燃料管理、高效冷却系统及新型能源装置中具有关键影响，其耦合物理规律直接决定运行安全性、热管理效率及性能极限。**因此，深入揭示流-热-相变耦合机制，是推动多相传热理论发展与理解复杂工况下物理规律的关键基础。**受制于成本、安全性及测量分辨率等因素，传统实验观测难以全面覆盖上述复杂耦合过程的多尺度演化行为，因此数值模拟成为揭示流-热-相变耦合机理并实现其演化过程定量预测的重要研究手段。

**这里要加一张实际应用场景的拼图来阐述真实的工程应用背景及物理意义。**

多年来，基于欧拉网格的计算流体力学方法，如体积函数法、相场法与水平集法等，在多相流动与相变传热模拟中得到了广泛应用。然而，在流-热-相变强耦合条件下，这类方法仍面临一系列难以回避的固有瓶颈。在剧烈界面运动、拓扑频繁变化或相变引起体积分数突变等极端工况下，界面重构算法难以同时保证几何保真度与曲率计算精度，界面质量守恒性受到破坏，易诱发非物理的虚假流动。同时，移动界面附近潜热源项的离散处理通常依赖经验插值或弥散化模型，容易引入显著的非物理能量误差，导致局部热力学不一致甚至数值不收敛。此外，在热传导与流动之间存在强非线性交互的情况下，显式或半隐式耦合策略对时间步长极为敏感，在多时间尺度并存时易产

生严重的数值刚性与稳定性瓶颈。特别是在密度比悬殊或局部热流密度极高的严苛条件下，上述问题进一步放大，在一定程度上制约了传统欧拉网格方法在复杂界面与非平衡过程中的建模精度与预测置信度。为弥补欧拉网格方法在复杂界面演化中的不足，已有研究尝试引入网格-粒子耦合策略，但在强相变与多尺度耦合条件下，其一致性构造与数值稳定性仍面临显著挑战。

相较于欧拉网格方法，拉格朗日无网格的光滑粒子流体动力学法（Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH）因无需界面重构，具备天然的界面随动追踪能力，并对界面拓扑变化与多相大变形具有良好适应性，被认为是模拟流-热-相变耦合过程的潜在重要数值手段。然而，现有 SPH 方法在处理多物理场强耦合问题时仍存在显著不足。首先，多数研究仍将流动、传热与相变过程解耦建模，物理模块之间主要通过状态量交换实现弱耦合，缺乏统一的离散框架与一致性构造，易导致动量与能量演化不同步，难以满足严格的热力学一致性要求。其次，不同物理模块往往采用不统一的核函数形式与数值稳定化策略，在多相界面处易诱发压力的非物理振荡，并在高密度比条件下引发严重的数值不稳定性。上述问题使得现有 SPH 方法难以在强相变、高密度比等复杂耦合工况下实现稳定、准确且长期一致的数值演化，制约了其由潜力方法向工程实用工具的进一步发展。

因此，针对传统网格法和现有 SPH 框架在耦合一致性、数值稳定性与计算精度上的固有瓶颈，从统一粒子体系、统一算子构造与统一耦合求解策略的角度出发，构建一套能够实现流动、传热与相变过程高精度、强耦合演化的计算框架，已成为亟待解决的关键问题。本项目以构建具备热力学一致性的多相统一 SPH 框架为目标，拟重点解决潜热源项的动量-能量耦合一致性、高密度比条件下的界面稳定性以及高阶精度守恒算子的构建等关键挑战。最终，项目将形成一套面向流-热-相变耦合问题的高精度多相统一 SPH 方法，在理论层面与底层算法层面推动多物理场拉格朗日离散理论的发展，构建统一、一致且具备良好可扩展性的数值计算框架。该研究不仅具有重要的基础科学意义，还将为航空航天热防护系统、深冷燃料管理等国家重大工程需求提供高置信度的设计与优化工具，具备显著的工程应用价值。

## 2. 国内外研究现状及分析

针对沸腾两相流的流-热-相变耦合过程涉及界面剧烈拓扑演化、物性参数的跨尺度突变以及强非线性传热等复杂物理特征，且常发生于高温、深冷

等极端工况条件下，使得界面位置、相变速率与温度场分布呈现显著的时空非均匀性。在此背景下，能够同时描述复杂界面演化、严格满足动量与能量守恒，并保持潜热交换热力学一致性的高保真数值模拟方法，已成为研究流-热-相变耦合机理及其演化规律的关键技术途径。然而，针对高度耦合的流-热-相变问题，不同数值方法在界面表示方式、潜热处理策略及耦合求解框架等方面存在显著差异，其适用工况范围与数值稳定性表现亦不尽相同。综合国内外相关研究进展，围绕流-热-相变耦合问题的数值求解策略主要形成了三类技术路径：基于欧拉网格的数值方法、融合欧拉与拉格朗日优势的网格-粒子耦合方法，以及以 SPH 为代表的无网格粒子方法。以下将围绕上述三类方法的发展脉络与核心机制，系统梳理其在处理流-热-相变等多物理场强耦合过程中的典型做法与代表性成果，重点对比分析其在界面描述能力、守恒一致性与数值稳定性等方面的共性瓶颈，进而凝练亟需突破的关键科学问题，为后续构建高精度多相统一计算框架明确技术路线与突破口。

放在为什么要做数值模拟那里：由于其复杂性和困难性，气液两相流的实验研究在可视化、测量、规模、可重复性和代表性方面都受到限制。同时，成本和时间投入也是限制实验研究的主要因素。因此，研究人员采用数值模拟方法研究气液两相流，并提出了气液两相流数值方法的研究方向。

多相流是复杂的物理现象 [1]，涉及界面处动量和能量的耦合、相变、表面张力以及其他复杂现象。在连续介质力学层面，多相流系统详细描述了不混溶相之间的界面动力学、破碎或聚结引起的拓扑变化以及润湿效应引起的界面-壁相互作用。多相流模拟在科学和工程领域应用广泛，并在各种应用中发挥着重要作用 [2]。由于不同流体相之间存在不连续性以及它们压缩性各异，因此，在数值方法中精确模拟多相流面临着诸多挑战 [3, 4]。尤其对于具有较大密度比的可压缩/不可压缩耦合多相流的模拟而言，这给数值模拟带来了三个主要挑战。首先，密度在不可压缩相中是恒定的，而在可压缩相中，密度会随压力和温度而变化。其次，流体速度零散度条件必须应用于不可压缩相，这要求精确的界面跟踪，并在界面附近模拟此约束时提出了数值挑战。最后，可压缩相中压力波的传播会使多相流界面处的正应力平衡变得复杂，并常常导致模拟失败。因此，用于模拟可压缩-不可压缩两相流问题的数值方法相当有限。

## 2.1 基于网格法的多相相变模拟方法及其耦合局限

传统的基于网格的 CFD 方法试图使用统一或非统一的方法来解决这些问题。统一方法是指对不可压缩相（水）和可压缩相（空气）使用同一组控制方程。**不可压缩相假设弱可压缩性，因此在整个区域内求解可压缩纳维-斯托克斯方程。**这类方法将不可压缩性视为一种极限情况。然而，由于各相之间的压缩性不一致以及声速差异较大，时间积分中使用的时间步长被限制在一个非常小的值 [5, 6]。使用统一方法模拟具有不同压缩性的流体时，会面临时间步长过小的问题。另一方面，非统一格式针对具有不同压缩性的流体求解不同的控制方程，并采用显式或隐式耦合来实现应力平衡。不同的控制方程组需要不同的数值格式，这使得求解过程更加复杂。基于欧拉网格的数值方法是研究流-热-相变问题中应用最为广泛的技术路线之一，在过去几十年中得到了广泛发展与应用。网格法中各个网格点通过拓扑映射以预定义的方式连接在一起，主要包括有限差分法（FDM）[7]、有限体积法（FVM）[8] 和有限元法（FEM）[9]。其基本思想都是在固定计算网格上求解多相流动与能量输运控制方程，并通过界面捕捉或追踪策略描述界面演化过程，从而实现流动、热传导与相变过程的耦合模拟。早期的研究主要依赖流体体积法（Volume of Fluid, VOF）进行界面捕捉 [10, 11]，通过计算单元内各相的体积分数来追踪界面位置，尤其在气泡流等两相流中得到了广泛的使用。Nikolopoulos 等人 [12] 采用有限体积法结合流体体积法研究了正庚烷和水滴撞击热表面的蒸发过程。Strotos 等人 [13] 采用流体体积法研究了水滴在低韦伯数下沉积在加热表面上的蒸发过程。Welch 和 Wilson [14] 则基于流体体积法推导了膜沸腾模型。该方法在大尺度界面运动问题中具有较好的守恒性，但在处理剧烈界面拓扑变化及曲率计算方面存在一定的局限性。其次水平集法（Level Set）[15, 16] 通过定义隐式函数表示界面，实现了拓扑变化的自然处理，并能够直接计算界面法向量与曲率，也为气液相变及两相流问题提供了良好的界面动力学描述。Tanguy 等人 [17] 结合了水平集方法和虚拟流体方法，以捕捉界面运动并处理界面处的条件。Son 和 Dhir [18] 基于水平集方法建立了膜沸腾模型。其次，相场方法（Phase Field）[19–21] 通过连续变量描述界面区域，将界面动力学与热传导的耦合纳入统一方程框架，在熔化/凝固、喷雾冷却以及薄膜沸腾等问题中得到了广泛应用。此外，结合格子玻尔

兹曼方法（Lattice Boltzmann method, LBM）[22, 23], 前沿跟踪方法（Front Tracking）[24] 等的多种网格方法也被广泛用于多相流及沸腾相变的数值模拟中。Juric 和 Tryggvason [25] 基于前沿追踪方法提出了汽液相变模型。在这些网格划分方法中，沸腾的传质速率被转化为速度散度的源项。换句话说，沸腾会导致界面两侧出现速度差；因此，体积膨胀可以通过欧拉网格上的界面运动直接考虑。在数值方法中，欧拉-欧拉方法 [X] 和欧拉-拉格朗日方法 [X] 被广泛应用于两相流问题，因为在这些问题中，相界面并非主要关注点。在精确表征相界面方面，流体体积法（VOF）、水平集法（LS）和 GFM-流体法（GFM）等方法具有明显的优势。**然而，VOF 和 LS 方法容易受到界面扩散的影响，导致界面表征的清晰度和精度下降。这些方法对表征复杂界面的网格尺寸和保证结果准确性的参数要求非常高。**

**这里要加一下网格法耦合特殊处理方法的图，其次也要加一些结果来说明这个方法在计算精度和效率方面是存在问题的。**

尽管网格法由于数值稳定性较高、边界条件处理成熟且对大尺度连续问题能够较为有效求解而在多物理场耦合模拟中具有广泛的应用，且对于涉及小变形相变问题时，能够提供相对精确的结果。在深冷燃料管理中，液氢及液氧在储存与输运过程中容易发生过冷沸腾、闪蒸及气液相分离，网格法通过捕捉气液界面及温度场分布，为预测储箱压力及燃料输运提供了重要工具。在航空航天热防护领域，烧蚀防热层及相变冷却材料中涉及材料熔融、气化及多孔介质内流动的耦合过程，网格法能够模拟流-热-相变耦合对热防护性能及安全裕度的影响。但它们需要专门的处理方法来精确追踪和捕捉界面，导致计算成本高昂。在处理自由界面大变形、高密度比及强耦合沸腾相变问题时仍存在显著瓶颈。界面拓扑变化剧烈时，传统重构算法难以保证几何保真度及曲率精度，易导致非物理流动或界面质量丢失，界面拓扑由于破碎合并时易出现数值扩散，导致界面拓扑变化不够鲁棒。潜热源项的离散通常依赖经验插值或弥散化处理，移动界面附近可能出现局部能量不守恒或热力学不一致，影响数值收敛性，界面追踪与热力学一致性处理容易产生假相变、温度过冲等。此外，在处理流动、热传导与相变强耦合时，显式或半隐式策略在多时间尺度下对时间步长高度敏感，容易出现数值刚性或不稳定现象，尤其在密度比悬殊或局部热流密度极高的条件下。物性跨尺度变化导致

稳定性受限，在深冷、高温都难以处理。因此，尽管网格法在工程应用中仍然是重要手段，其在高精度、多场强耦合问题下的适用性和可靠性仍面临方法本身难以克服的瓶颈问题。

由于传热的物理问题通常涉及复杂的流体流动，特别是涉及多种材料和多个界面时，这些流动过程会导致界面飞溅和破裂，而热过程和化学过程又会引入进一步的复杂性，所有这些有时都会给基于网格的方法带来挑战，因为难以准确地捕捉界面。

## 2.2 欧拉-拉格朗日耦合方法及其一致性挑战

网格-无网格耦合方法是在传统欧拉网格方法与拉格朗日无网格方法各具优势而又存在显著局限的背景下发展起来的一类重要计算策略。其核心思想是在欧拉网格上求解连续场，如流场、温度场、电磁场或压力场等，同时使用拉格朗日例子方法，如 SPH, MPS, MPM 等方法，描述界面运动、大变形结构或局部相变质量交换，从而在保持欧拉框架计算稳定性的前提下，实现对强非线性拓扑变化、多场耦合及大位移现象的更高保真模拟，网格负责大域求解，粒子负责局部细节。最早的网格-无网格耦合尝试在流固耦合领域，欧拉网格用于求解不可压流体，固体结构采用拉格朗日有限元表示，例如 FEM-SPH 耦合方法。随着研究对象从单一结构大变形拓展到多物理场耦合，网格-无网格方法开始被系统引入沸腾相变多相流等复杂问题中。基于网格的方法能够很好地预测流场变量的分布，而基于粒子的方法在相界面追踪方面具有天然优势。近年来，许多研究将这两种方法结合起来，开发了一系列网格-粒子耦合模拟方法 [26–30]，并且用于气泡等沸腾两相流等模拟。Xu 等人 [28, 31] 开发了一种 ISPH-FVM 耦合方法并将该耦合方法从二维扩展到三维，并成功应用于静态流体中气泡上升和合并的模拟分析。Zhao 等人 [29] 开发了一种 SPH-FVM 耦合方法来模拟电场对液滴形状的影响。在该耦合方法中，两相流的控制方程采用 SPH 方法求解，电场则采用 FVM 方法求解。这些耦合方法在不牺牲数值稳定性的前提下可以处理界面断裂、重接触、微尺度蒸发、多相破碎与飞溅等网格法难以处理的现象。在喷雾蒸发、液滴撞壁、薄膜沸腾等现象中都得到了一定的应用。SUN: 研究人员还探索了将粒子方法与其他无网格技术相结合来模拟气液相变的方法，例如使用流动方向局部网格的无网格平流（MPS-MAFL）和状态方程方法。Hochstetter 和 Kolb [32] 将

粗网格用于气相模拟，将基于 SPH 的液相模拟耦合，以模拟蒸发和冷凝过程。Tian 等人分别使用 MPS 和状态方程描述液相和气相，模拟了不同过冷度下的单气泡冷凝过程。

这里要加一下两种方法耦合处理的图，其次也要加一些结果来说明这个方法在计算精度和效率方面是存在问题的。

尽管这些粒子与网格的耦合方法经过一定的发展，在模拟多物理场中的复杂相变流动方面具有巨大的潜力，然而若干核心挑战仍普遍存在并限制其在强耦合相变问题中的可靠性与精度。网格与粒子之间的双向投影往往是精度与守恒性的薄弱环节，但高精度投影算子与修正项的引入将大幅提升复杂度与计算成本。粒子表示的统计噪声与映射带来的高频误差会在热场计算中被放大，导致温度场震荡或潜热耦合不稳定。混合方法在高密度比或高物性梯度，如深冷液体与气相条件下的稳定性尚待明晰，引入的界面跳跃和物性不连续性会影响压力与热场求解的收敛性。同时相变界面位置在网格和粒子之间难以保证完全一致，导致界面产生漂移，网格与粒子之间的物性场离散不一致会导致温度场不连续。

总体来看，网格-无网格耦合方法已成为连接网格法与纯粒子法的关键桥梁。它们把粒子的局部灵活性与网格的全局守恒优势结合起来，在处理界面剧变与多场耦合方面展示出明显潜力。但是由于投影守恒性、热质量耦合一致性、粒子抑制等基础问题制约了耦合方法成为高保真度模拟方法。

### 2.3 无网格法（SPH）在流热相变模拟中的进展与不足

近年来，无网格粒子方法的研究逐渐兴起，为模拟具有混合异质界面和移动边界的流体流动提供了新的选择。与传统的基于网格的方法相比，无网格方法由于省去了复杂的网格处理，并且能够自然地追踪异质界面和移动边界，因此在处理移动界面和剧烈变形方面具有一些固有的便利性。在无网格粒子方法中，光滑粒子流体动力学（SPH）方法已成为发展最快、使用最广泛、最成熟的方法。

无网格粒子方法作为摆脱固定网格约束的连续介质离散策略，与依赖固定网格结构的方法不同，通过拉格朗日粒子的运动与相互作用来描述流体和界面行为。无网格粒子方法如光滑粒子流体动力学（Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH）和移动粒子半隐式法（Moving Particle Semi-implicit,

MPS)，由于其拉格朗日性质逐渐兴起，并在模拟复杂的多相流方面具有巨大的潜力，为模拟具有混合异质界面和移动边界的流体提供了新的选择。在这些方法中，SPH 已成为一种应用广泛且研究深入的方法。

与基于网格的方法相比，SPH 是一种拉格朗日粒子方法，它无需引入额外的追踪技术即可轻松追踪多相界面。这使其在处理多相界面方面更加灵活。因此 SPH 自然地被扩展并应用于多相流模拟，并且已经提出了多种多相 SPH 模型 [33–36]。在这些模型中，密度计算方案已成为重要的研究点，因为材料的可压缩性特征（可压缩和不可压缩行为）直接反映在密度演变中。一般来说，多相 SPH 模拟中处理密度差的方法有两种：密度求和法和连续密度法 [37]。密度求和法被认为更适合处理密度比大的多相流，而连续密度法更适合处理密度比小的多相流 [38]。为了精确捕捉密度求和法构建的多相界面处的密度不连续性，Hu 和 Adams [33] 从粒子平滑函数推导出了粒子平均空间导数的基本近似值。在这种方法中，相邻粒子仅对比容有贡献，而对密度没有贡献。Park 等人 [39] 使用参考密度对密度求和进行归一化。对于连续密度方法，可以使用基于体积的离散梯度来重新表述动量方程 [40–42] 和扩散项 [24, 36, 43]。近年来，黎曼求解器也被用于多相流模拟 [3, 22]。然而，这些方法仅仅从数值角度缓解了由可压缩性差异引起的不稳定性问题，而没有从根本上解决核心问题。这种局限性源于物理层面上可压缩流体和不可压缩流体的密度演化基本方程本质上是不同的。近年来，黎曼求解器也被用于多相流模拟 [3, 44]。然而，这些方法仅仅从数值角度缓解了由可压缩性差异引起的不稳定性问题，而没有从根本上解决核心问题。这种局限性源于物理层面上可压缩流体和不可压缩流体的密度演化基本方程本质上是不同的。

在多相 SPH 模拟中，不均匀的粒子分布和非物理的界面间隙也会导致数值不稳定。为了应对这些挑战，人们提出了几种稳定策略。一种被广泛采用的策略是引入背景压力，以减轻负压引起的颗粒聚集 [34, 45]。

与传统基于网格的方法相比，由于无网格方法省去了部分复杂的网格处理，并且能够自然地追踪异质界面和移动边界，因此在处理移动界面和剧烈变形方面具有一些固有的便利性。粒子方法也已被用于模拟液-液界面流动 [XXX]、两相气-液流动 [XXX]、流体-刚性相互作用 [XXX] 和流固耦合 [XXX]。由于密度比可忽略不计，凝固相变模拟可以通过增加粘度 [XXX] 或

固定颗粒 [XXX] 很容易建模，因此这些粒子法已被广泛应用于分析核工程中复杂的多相流，包括传热和固液相变。然而，由于密度和体积的显著变化，气液相变的建模比固液相变的建模要困难得多。开发可靠且通用的汽化或沸腾相变模型可以显著扩展粒子方法的应用范围，尤其考虑到沸腾现象在热工程、化学工程和核工程领域中普遍存在。近年来，一些显著的发展显著提高了粒子方法的可靠性，例如高阶离散化方案 [XXX]、输运速度公式 [XXX]、粒子移动 [XXX] 和边界条件改进 [XXX] 等。

对于粒子方法而言，由于口 气液界面处密度不连续跃变和 口 气相体积急剧膨胀，建立沸腾模型尤其具有挑战性。关于密度跃变，模拟多相气液流动的方法基本上有两种。首先是同步求解方法，也称为单流体模型 [X]。在这种方法中，气相和液相被视为一种具有可变密度和粘度的流体。基本上对所有流体相应用一种离散化模型，最终同时求解。这种方法的优点是易于实现，但密度突变导致的不稳定性风险是其主要挑战。Colagrossi 和 Landrini[X] 开发了一种稳定的弱可压缩 SPH (WCSPH) 方法，用于水-空气流动，该方法具有改进的人工粘度项和人工内聚力。随后，基于显式 SPH[XXX]、隐式 SPH[XX] 和隐式 MPS[XX] 的多相粒子求解器相继被开发出来。然而，对于气液两相流，大多数此类方法通常采用密度和粘度平滑 [46]。为了处理较大的密度跃变，黎曼求解器也被应用于 WCSPH 两相流问题 [3]。均匀多相求解器采用了密度约束 [X]、均匀平均法 [X] 和相函数 [X] 等技术。与单相模拟相比，该方法获得了更优的结果 [XX]。然而，这类算法在处理较大的体积变化和密度变化以及表示密度和粘度的急剧不连续性方面存在困难。= 遗憾的是，拉格朗日粒子方法难以处理同时求解过程中较大的体积变化。密度和黏度的变化规律差异显著，密度大跃变和和粘度差异。引起极大的不稳定性，控制方程分别对应于可压缩流体和不可压缩流体。气液两相流算法的稳定性和精度极具挑战性。这是因为不同相之间的压缩性和声速差异显著。这些差异显著增加了界面动力学和整体流动行为精确解析的难度。

第二种气液流动方法是交替求解方法（或耦合算法），其中气相和液相的计算（至少是压力计算）交替进行。这样界面处的不连续密度跃变得以保留，相应的失稳现象也得以避免。Lind 等人 [47] 最近利用 SPH 提出了一种不可压缩-可压缩 SPH 方法，该方法结合了不可压缩 SPH 和 WCSPH 方法来模拟

水-空气问题。耦合策略如下：气相为液相提供狄利克雷压力边界，而液相为气相提供速度边界。此外，该方法已与多相 PS 算法相结合，用于模拟水-空气流动 [48]，同时上述研究中表面张力模型并未被考虑。然而，正如 Nair 和 Tomar [49] 指出的那样，没有考虑在高压梯度液体流动中受限的气泡，也未考虑表面张力模型。于是他们开发了一种类似的基于 SPH 方法的可压缩-不可压缩耦合，其中可压缩-不可压缩相互作用通过他们推导出的 Rayleigh-Plesset 问题得到验证，但在界面附近仍意外地发生了严重的粒子混合，尤其对于高密度比的情况。目前文献中仍然缺乏可靠的表面张力气泡流动耦合算法，因此，需要进一步明确耦合算法中表面张力模型的选择，如 Duan 等人 [50] 开发了 MPS-SPH 方法模拟气泡。**由于不同相的交替计算，在第二种方法中考虑气体体积膨胀相对容易。**

模拟沸腾现象的第二个挑战，即**气体/蒸汽的体积膨胀**，将针对粒子方法进行描述。在拉格朗日框架下，体积膨胀的模拟难以实现。因此，大多数关于沸腾的数值研究都采用了欧拉网格方法。气体体积膨胀会导致气相颗粒分布逐渐稀疏。具体而言，气体颗粒半径会逐渐增大，最终导致界面处出现严重的多分辨率问题。这个问题在同步求解方法中尤其难以解决。因此，只有少数研究采用粒子方法模拟沸腾相变。在 SPH 框架下，Sigalotti 等人 [51] 基于扩散界面模拟了微重力环境下范德华（vdW）液滴的蒸发。为了解决严重的分辨率问题，采用了全自适应 SPH 模型。范德华状态方程的内聚部分和毛细力自动产生表面张力，从而维持液滴的形状。这一方法被进一步扩展以模拟范德华液滴的剧烈沸腾现象 [52]。Yang 和 Kong [53] 也开发了一种用于蒸发过程的 SPH 方法，该方法允许颗粒质量变化，从而能够轻松计算传质过程。颗粒质量的变化导致颗粒半径不同；因此，需要开发颗粒分裂/合并技术。在以上的研究中 [51–53]，界面是扩散的而不是清晰的 **这里要加一个图说明界面的扩散与清晰的对比**。此外，Das 和 Das [54] 提出了一种基于 SPH 的气液相变模型，通过引入伪粒子来积累蒸汽质量。当伪粒子具有足够的质量后，需要进行粒子重分布和变量插值，以考虑体积膨胀并克服严重的多分辨率问题。总之，为了处理体积膨胀和相关的多分辨率问题，自适应 SPH 方法在一定程度上有所帮助，但会产生扩散界面 [51–53]。在其他情况下，则需要进行粒子分裂/合并 [53] 或粒子重分布 [54]。Duan 等人 [50] 开发一种拉格

朗日粒子方法框架，用于处理具有急剧密度跃变的两相气液流动；此外，还试图证明其能够以直接的方式处理沸腾引起的气体体积膨胀。

在传热和相变领域，SPH 引起相当大的关注。在传热领域，Cleary 和 Monaghan [55] 是第一个将 SPH 应用于传热问题的人，提出了热传导方程的 SPH 公式并对标准 SPH 公式进行了修改，以确保不同材料界面处热流的连续性然后，Chen 等人 [56] 将修正的 SPH 方法 (CSPM) 应用于非稳态传热问题，以求解导热模型中核函数的二阶导数，证明了其提高边界精度的能力。Jeong 等人 [57] 通过将二阶偏微分方程分解为两个一阶方程改进了传热算法，使得该方法能够应用于复杂的几何形状。他们还实现了幽灵粒子边界，以修改壁面附近的系统变量，从而能够确定结构的瞬时温度场。Rusty 等人 [58] 开发了一种使用 Crank-Nicolson 隐式时间积分的 SPH 算法来模拟热传导问题，提高了 SPH 在长期热传导模拟中的稳定性。Chaniotis 等人 [59] 提出了一种新的重新网格化 SPH 方法来模拟粘性导热流，准确地考虑了粘度和热扩散效应。此外，许多研究人员已将基于 SPH 的热质传递算法应用于自然对流 [X] 和纳米流体动力学 [X] 等热问题的数值模拟中，进一步证明了其在解决复杂传热挑战方面的多功能性和有效性。关于热对流，Yang 等人 [X] 进行了自然对流的模拟，并探讨了普朗特数和瑞利数对流动状态的影响。Zhang 等人 [X] 和 Yang 等人 [X] 采用了粒子移位技术 (PST) 来提高数值模拟的精度和稳定性，以模拟高雷诺数和瑞利数下的热对流颗粒流动。考虑到相变传热，Monaghan 等人 [60] 首先研究了纯液体的凝固过程，包括点热源和不规则系统边界。Farrokhpanah 等人 [61] 开发了一种新的 SPH 方案，用于研究传热凝固和熔化过程中相变温度附近潜热的变化。

已有研究极大地促进了 SPH 传热技术的发展，但针对多相流（例如气液流）的传热研究仍然有限，需要进一步研究。为了解决这个问题，Fang 等人 [62] 开发一种精确的多相流热力学 Riemann-SPH 模型。该模型考虑了热扩散率对瞬态传热的影响，并引入了黎曼近似来处理不连续的温度场，从而与其他 SPH 方案相比，在热传导模拟方面具有更高的精度。此外，通过状态方程将热温度场与压力联系起来，本模型能够考虑热流体耦合效应，即流动温度会影响流动的压力场，从而影响流体的运动。最后，对于强可压缩流体，通过添加由流体可压缩性引起的内能变化，并进一步考虑强可压缩流动

中的热辐射效应，传热 SPH 模型得到了进一步增强。

孙中国对沸腾和冷凝现象的描述是一个具有挑战性的问题，因为其涵盖了各种复杂的现象，例如湍流效应、热传递、相变以及具有大密度比的多相流等。Sun 等人 [63] 提出一种拉格朗日不可压缩-可压缩无网格粒子方法，用于模拟涉及沸腾和冷凝的多相流。该多相方案结合了 MPS 和 SPH，同时引入了基于传热的相变模型来模拟气液相变。为了获得清晰的相界面并建立相变模型，本研究采用了不进行人工平滑的独立时间步进多相方案。同时，在沸腾和冷凝过程中，气相的体积会发生剧烈变化；因此，需要采用粒子分裂和合并方法来防止粒子尺寸出现显著差异。□ 首要挑战是实现气相和液相的稳定耦合。因为气相和液相的物理性质差异显著，尤其是在密度、黏度和压缩性方面。粒子方法通常直接利用粒子模拟多相流。一种有效的方法是平滑物性不连续性并同步计算各相。一些研究人员采用单流体模型，即使用物性可变的流体来表示多相流，并对界面处的物性进行平滑处理。Lyu 等人 [64] 采用连续状态方程计算空化。平均算子也通常在这些方法中使用来保持连续的加速度场，比如 [3, 50]，然而，这些物理性质平滑方法在处理剧烈的体积变化时并不具有优势。另一种方法是使用不同的时间步进方法分别计算每个阶段，然后通过边界件将它们耦合起来 [47, 49, 50]。□ 第二个挑战在于相变模型。对无网格粒子方法的气液相变模型的研究起步较晚，仍需进一步研究，并且欧拉方法中使用的速度散度源项不太适合粒子方法。关于粒子法沸腾模型的研究比关于冷凝模型的研究要多。Duan 等人 [50] 通过在界面处插入气体颗粒来模拟沸腾现象。通过引入相应状态方程，SPH 可以将气液两相流的空化、蒸发和沸腾现象模拟为连续流体。

几十年来，粒子方法研究界一直致力于研究沸腾和冷凝流动这一课题，但尚未建立准确、稳健和统一的纯粒子沸腾-冷凝方案。相变怎么产生的比较重要，bubble 怎么产生的，以及 bubble 产生之后的密度差该如何处理，体积膨胀该如何处理，两相流的问题该如何解决。尽管研究对象具有较高数值复杂性，但通过逐级引入物理机制、模块化算法设计以及多层次算例验证，可有效控制研究风险，确保研究目标在项目周期内实现。

The heat transfer process in the hydrogen precooler is dominated by wall-induced subcooled flow boiling under high-pressure forced convection conditions.

Local vapor bubble nucleation and condensation occur near the heated wall, while the bulk flow remains in the liquid phase. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) is adopted to resolve the transient liquid-vapor interface and boiling dynamics at the mesoscale.

现有工作往往把两相耦合、相变源项、多分辨率粒子处理当作可独立叠加的模块，分别改进各自的稳定性或效果；但在液氢/氢气这类强物性差异与体积剧变工况下，这三者在离散层面强耦合——粒子拓扑操作会改变界面几何与离散邻域，进而影响压力/速度通量与界面热通量；相变源项又会改变局部密度/体积分布与压力解的约束，使得“单项优化”容易引入隐性守恒误差与伪流。

### 3. 发展动态分析与存在的主要问题

通过以上国内外研究现状分析可见，面向气液界面流动-传热-相变耦合过程的数值模拟研究总体朝着提升算法鲁棒性与守恒一致性的方向发展。尽管相关研究取得进展，但针对气液相变两相流的无网格 SPH 模拟仍存在共性瓶颈，限制了其在高物性差异、强温差与体积剧变条件下的稳定性与可靠性。归纳而言，主要问题集中在以下三个方面：

(1) **界面压力-速度传递离散不相容，导致耦合稳定性受限。** 分离式两相 SPH 依赖界面边界条件的双向传递实现耦合，但界面核支撑域截断、粒子扰动及两相可压性差异易放大界面离散误差，使压力-速度传递离散不相容，诱发界面压力振荡、寄生流与相间掺混等失稳现象。现有方法多借助平滑或阻尼抑制振荡，但对稳定化强度的选取较为敏感，难以同时保持稳定性与守恒一致性。

(2) **相变闭合与潜热交换守恒不足，源项易引发耦合误差放大。** 相变建模中常将潜热以源项直接叠加，或在界面附近插值/平滑更新，使界面热通量与相变质量通量难以严格闭合，易出现温度过冲、假相变与能量漂移。相变引起的质量与能量变化还会改变局部密度与体积分布，进而扰动压力求解与速度更新，放大耦合误差并诱发相变速率的非物理波动，限制计算稳定域与适用范围。

(3) **体积剧变与多时间尺度约束缺少统一处理，粒子自适应与守恒难兼顾。** 液-气相变伴随体积快速变化，造成粒子稀疏与邻域退化；声学 CFL 与热

扩散/相变源项刚性进一步压缩时间步长，降低推进效率与稳定裕度。分裂/合并等粒子重构用于维持分辨率，但变量重分配与同步更新缺少守恒约束，易引入隐性质量/能量误差并扰动压力场，削弱整体稳定性并限制适用工况。

#### 4. 本项目拟开展的研究课题

针对上述瓶颈，本项目拟开展气液相变两相流的 SPH 守恒一致耦合方法研究，围绕界面耦合、相变闭合与体积剧变下粒子自适应三个关键环节，在 SPH 离散框架内构建守恒一致、稳定可靠的无网格耦合求解方法。

(1) 开展界面压力-速度信息传递的离散相容与稳定耦合研究，形成稳健的界面传递机制，抑制界面压力非物理振荡与寄生流，构建守恒一致的两相耦合推进框架。

(2) 开展热通量驱动的相变质量通量闭合与潜热交换守恒实现研究，提出与压力求解相协调的相变更新策略，降低温度过冲、假相变与能量漂移。

(3) 开展体积剧变条件下的守恒粒子分裂/合并与多时间尺度推进研究，形成带守恒约束的粒子重构与变量重分配方法，保证拓扑操作不破坏界面耦合与相变闭合的一致性。

#### 参考文献

- [1] Brennen C E. *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge university press, 2005.
- [2] Sattari A, Hanafizadeh P, Hoorfar M. Multiphase flow in microfluidics: From droplets and bubbles to the encapsulated structures. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 282: 102208.
- [3] Rezavand M, Zhang C, Hu X. A weakly compressible sph method for violent multi-phase flows with high density ratio. *Journal of Computational Physics*, 2020, 402: 109092.
- [4] 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. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109538.
- [5] Hauke G, Hughes T. A unified approach to compressible and incompressible flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, 113(3-4): 389-395.
- [6] Hauke G, Hughes T J. A comparative study of different sets of variables for solving compressible and incompressible flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1998, 153(1-2): 1-44.
- [7] Smith G D. *Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods*. Oxford university press, 1985.

- [8] Eymard R, Gallouët T, Herbin R. Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, 2000, 7: 713-1018.
- [9] Reddy J N. An introduction to the finite element method. New York, 1993, 27(14).
- [10] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [11] Lafaurie B, Nardone C, Scardovelli R, et al. Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with surfer. *Journal of computational physics*, 1994, 113(1): 134-147.
- [12] Nikolopoulos N, Theodorakakos A, Bergeles G. A numerical investigation of the evaporation process of a liquid droplet impinging onto a hot substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(1-2): 303-319.
- [13] Strotos G, Gavaises M, Theodorakakos A, et al. Numerical investigation on the evaporation of droplets depositing on heated surfaces at low weber numbers. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, 51(7-8): 1516-1529.
- [14] Welch S W, Wilson J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change. *Journal of computational physics*, 2000, 160(2): 662-682.
- [15] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *Journal of computational physics*, 1988, 79 (1): 12-49.
- [16] Sussman M, Smereka P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *Journal of Computational physics*, 1994, 114(1): 146-159.
- [17] Tanguy S, Ménard T, Berlemont A. A level set method for vaporizing two-phase flows. *Journal of Computational Physics*, 2007, 221(2): 837-853.
- [18] Son G, Dhir V K. *Numerical simulation of film boiling near critical pressures with a level set method*. 1998.
- [19] Badalassi V E, Ceniceros H D, Banerjee S. Computation of multiphase systems with phase field models. *Journal of computational physics*, 2003, 190(2): 371-397.
- [20] Chiu P H, Lin Y T. A conservative phase field method for solving incompressible two-phase flows. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230(1): 185-204.
- [21] Yang Q, Li B Q, Shao J, et al. A phase field numerical study of 3d bubble rising in viscous fluids under an electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 820-829.
- [22] Safari H, Rahimian M H, Krafczyk M. Consistent simulation of droplet evaporation based on the phase-field multiphase lattice boltzmann method. *Physical Review E*, 2014, 90(3): 033305.
- [23] Wang Y, Shu C, Yang L. An improved multiphase lattice boltzmann flux solver for three-dimensional flows with large density ratio and high reynolds number. *Journal of Computational Physics*, 2015, 302: 41-58.
- [24] Tryggvason G, Bunner B, Esmaeeli A, et al. A front-tracking method for the computations of multiphase flow. *Journal of computational physics*, 2001, 169(2): 708-759.

- [25] Juric D, Tryggvason G. Computations of boiling flows. International journal of multiphase flow, 1998, 24(3): 387-410.
- [26] Liu X, Morita K, Zhang S. A conservative finite volume-particle hybrid method for simulation of incompressible interfacial flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 355: 840-859.
- [27] Li G, Gao J, Wen P, et al. A review on mps method developments and applications in nuclear engineering. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2020, 367: 113166.
- [28] Xu Y, Yang G, Hu D. A three-dimensional isph-fvm coupling method for simulation of bubble rising in viscous stagnant liquid. Ocean engineering, 2023, 278: 114497.
- [29] Zhao Y, Huo L, Xu W, et al. Coupling of smoothed particle hydrodynamics and finite volume method for electrohydrodynamic droplet deformation simulation. Computers & Fluids, 2024, 270: 106162.
- [30] Xu Y. Numerical investigation of bubble-induced heat transfer under external electric field based on isph-fvm coupling method. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2026, 117: 110132.
- [31] Xu Y, Yang G, Zhu Y, et al. A coupled sph–fvm method for simulating incompressible interfacial flows with large density difference. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2021, 128: 227-243.
- [32] Hochstetter H, Kolb A. Evaporation and condensation of sph-based fluids// *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. 2017: 1-9.
- [33] Hu X Y, Adams N A. A multi-phase sph method for macroscopic and mesoscopic flows. Journal of Computational Physics, 2006, 213(2): 844-861.
- [34] Guo C, Zhang H, Qian Z, et al. Smoothed-interface sph model for multiphase fluid-structure interaction. Journal of Computational Physics, 2024, 518: 113336.
- [35] Pozorski J, Olejnik M. Smoothed particle hydrodynamics modelling of multiphase flows: an overview. Acta Mechanica, 2024, 235(4): 1685-1714.
- [36] Le Touzé D, Colagrossi A. Smoothed particle hydrodynamics for free-surface and multiphase flows: a review. Reports on Progress in Physics, 2025.
- [37] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics. Reports on progress in physics, 2005, 68(8): 1703.
- [38] Suresh P, Kumar S P, Pantaik B. A comparative study of two different density estimation techniques for multi-phase flow simulations using sph. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2019, 20(1): 29-47.
- [39] Park S H, Jo Y B, Ahn Y, et al. Development of multi-gpu–based smoothed particle hydrodynamics code for nuclear thermal hydraulics and safety: potential and challenges. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 86.
- [40] Colagrossi A, Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. Journal of computational physics, 2003, 191(2): 448-475.

- [41] Grenier N, Antuono M, Colagrossi A, et al. An hamiltonian interface sph formulation for multi-fluid and free surface flows. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228 (22): 8380-8393.
- [42] Hammani I, Marrone S, Colagrossi A, et al. Detailed study on the extension of the  $\delta$ -sph model to multi-phase flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 368: 113189.
- [43] Tartakovsky A M, Trask N, Pan K, et al. Smoothed particle hydrodynamics and its applications for multiphase flow and reactive transport in porous media. *Computational Geosciences*, 2016, 20(4): 807-834.
- [44] Meng Z F, Wang P P, Zhang A M, et al. A multiphase sph model based on roe's approximate riemann solver for hydraulic flows with complex interface. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 365: 112999.
- [45] He F, Zhang H, Huang C, et al. A stable sph model with large cfl numbers for multiphase flows with large density ratios. *Journal of Computational Physics*, 2022, 453: 110944.
- [46] Zhang A, Sun P, Ming F. An sph modeling of bubble rising and coalescing in three dimensions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 294: 189-209.
- [47] Lind S J, Stansby P K, Rogers B D. Incompressible-compressible flows with a transient discontinuous interface using smoothed particle hydrodynamics (sph). *Journal of Computational Physics*, 2016, 309: 129-147.
- [48] Mokos A, Rogers B D, Stansby P K. A multi-phase particle shifting algorithm for sph simulations of violent hydrodynamics with a large number of particles. *Journal of Hydraulic Research*, 2017, 55(2): 143-162.
- [49] Nair P, Tomar G. Simulations of gas-liquid compressible-incompressible systems using sph. *Computers & Fluids*, 2019, 179: 301-308.
- [50] Duan G, Yamaji A, Sakai M. An incompressible-compressible lagrangian particle method for bubble flows with a sharp density jump and boiling phase change. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 372: 113425.
- [51] Sigalotti L D G, Troconis J, Sira E, et al. Diffuse-interface modeling of liquid-vapor coexistence in equilibrium drops using smoothed particle hydrodynamics. *Physical Review E*, 2014, 90(1): 013021.
- [52] Sigalotti L D G, Troconis J, Sira E, et al. Smoothed particle hydrodynamics simulations of evaporation and explosive boiling of liquid drops in microgravity. *Physical Review E*, 2015, 92(1): 013021.
- [53] Yang X, Kong S C. Smoothed particle hydrodynamics method for evaporating multiphase flows. *Physical Review E*, 2017, 96(3): 033309.
- [54] Das A K, Das P. Modeling of liquid-vapor phase change using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 2015, 303: 125-145.
- [55] Cleary P W, Monaghan J J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 1999, 148(1): 227-264.

- [56] Chen J, Beraun J, Carney T. A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 46(2): 231-252.
- [57] Jeong J, Jhon M, Halow J, et al. Smoothed particle hydrodynamics: Applications to heat conduction. *Computer Physics Communications*, 2003, 153(1): 71-84.
- [58] Rook R, Yildiz M, Dost S. Modeling transient heat transfer using sph and implicit time integration. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 2007, 51(1): 1-23.
- [59] Chaniotis A, Poulikakos D, Koumoutsakos P. Remeshed smoothed particle hydrodynamics for the simulation of viscous and heat conducting flows. *Journal of Computational Physics*, 2002, 182(1): 67-90.
- [60] Monaghan J J, Huppert H E, Worster M G. Solidification using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of computational Physics*, 2005, 206(2): 684-705.
- [61] Farrokhpour A, Bussmann M, Mostaghimi J. New smoothed particle hydrodynamics (sph) formulation for modeling heat conduction with solidification and melting. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 2017, 71(4): 299-312.
- [62] Fang X L, Wang P P, Meng Z F, et al. An accurate thermodynamic riemann-sph model for multiphase flows with applications in bubble dynamics. *Journal of Computational Physics*, 2025, 533: 113969.
- [63] Han P, Cong H, Zhou Z, et al. An incompressible–compressible multiphase mesh-free particle method for boiling and condensation simulation. *Physics of Fluids*, 2024, 36 (6).
- [64] Lyu H G, Sun P N, Colagrossi A, et al. Towards sph simulations of cavitating flows with an eosb cavitation model. *Acta Mechanica Sinica*, 2023, 39(2): 722158.

## (二) 研究内容

(提纲不做限制, 请按照研究工作的自身逻辑撰写。应提炼出特色与创新点、年度研究计划)

### 1. 研究目标

本项目面向低温相变换热等典型工况中的气液相变两相流数值模拟需求, 发展基于无网格 SPH 的守恒一致耦合方法。针对强物性差异与相变诱导体积剧变条件下的计算难题, 需要同时应对“界面稳定耦合”“相变守恒更新”与“粒子守恒重构”三方面挑战, 着重解决**“相界面物性跃变处压力-速度信息的稳定传递与界面耦合一致离散”**和**“相变闭合与粒子自适应在统一离散框架下的守恒一致实现”**两大核心科学问题。总体研究思路如图1所示。

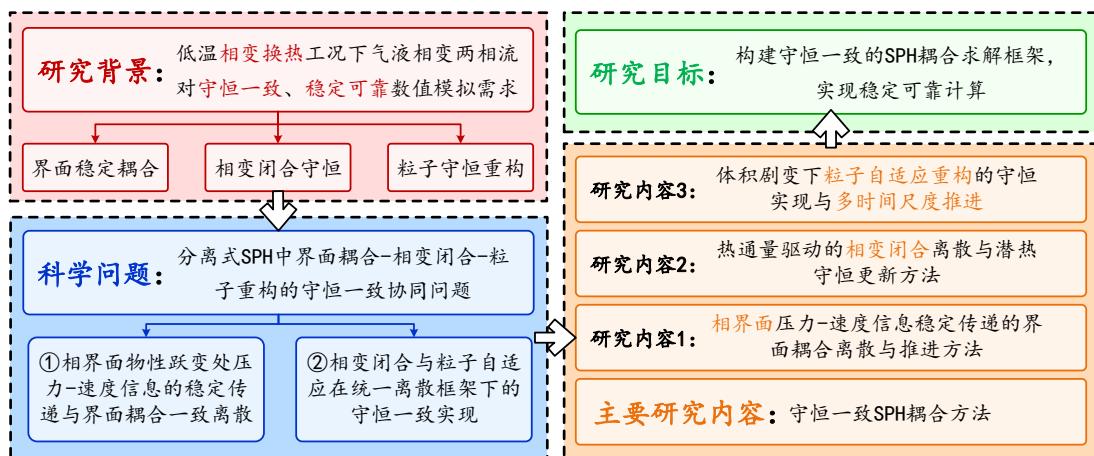


图 1. 本项目总体研究思路示意图

本项目属于无网格法 (SPH) 数值算法的基础研究, 主要研究目标包括:

(1) **界面耦合**: 建立相界面物性跃变处压力-速度信息的稳定传递方法, 完善界面边界条件与约束的施加与交换机制, 使两相耦合推进在高密度比条件下抑制界面压力振荡与寄生流。

(2) **相变更新**: 建立热通量驱动的相变质量通量闭合与潜热交换守恒更新方法, 提出与两相耦合推进相协调的相变更新策略, 降低温度过冲、假相变与能量漂移, 提升相变速率计算的稳定性与可控性。

(3) **体积剧变**: 建立体积剧变条件下带守恒约束的粒子分裂/合并与变量重分配策略, 并与多时间尺度推进相协同, 保证粒子自适应重构不破坏界面耦合与相变闭合的一致性, 维持计算精度与稳定性。

在上述目标基础上, 形成一套**面向气液相变两相流的分离式 SPH 守恒一**

**致耦合求解方法**，实现界面耦合、相变闭合与粒子自适应在统一离散框架下的稳定协同，并通过由简到繁的典型算例开展系统检验。

## 2. 研究内容

为达到上述目标，本项目拟开展三个方面的研究工作。研究内容与相互支撑关系如图2所示。具体研究内容阐述如下：

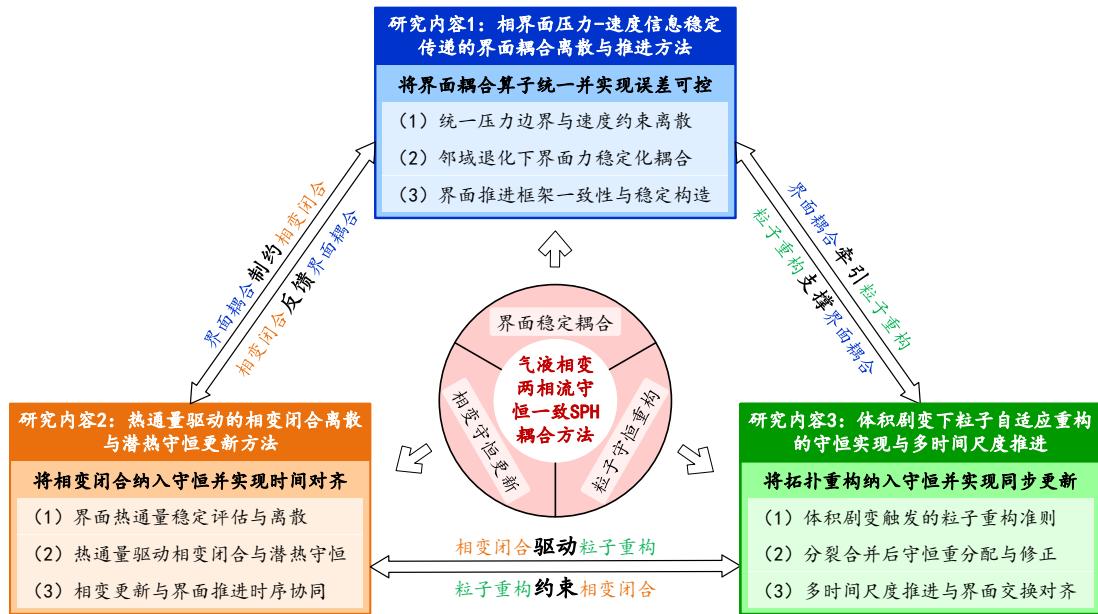


图 2. 本项目拟开展的研究内容

### 研究内容 1：相界面压力-速度信息稳定传递的界面耦合离散与推进方法

**(1) 界面边界条件的离散构造与交换形式统一：**面向分离式两相 SPH 求解流程，针对两相可压性描述与推进方式差异，在受限核支撑与界面几何约束下统一压力边界重构与速度约束施加的离散表达，使两者共享一致的界面几何权重、法向信息与邻域支撑数据；同时明确界面信息在各变量更新链路中的调用与交换顺序，避免同一时间层中界面输入不一致导致的误差注入与耦合漂移。

**(2) 邻域退化下的误差抑制与界面力平衡稳定化：**针对核支撑域截断与粒子扰动引起的边界误差放大，研究与界面离散形式相协调的稳定化处理与强度选取，使稳定化在抑制压力振荡的同时不破坏守恒一致性。进一步将表面张力等界面力纳入界面耦合离散的一致框架，统一界面法向/曲率评估与梯度/散度修正，保证界面力与压力-速度传递同构匹配，抑制寄生流与相间掺混的放大。

**(3) 耦合推进流程的同构组织与接口定义：**围绕“界面交换—压力求解—

速度更新”的时间推进链路，研究在同一时间层内的同构组织方式，明确界面交换量、更新顺序与必要的修正环节，形成可与相变更新与粒子自适应模块直接对接的界面推进框架，并在典型两相算例中检验其稳定性与守恒一致性表现。

### **研究内容 2：热通量驱动的相变闭合离散与潜热守恒更新方法**

**(1) 物性跃变条件下界面热通量的稳定评估与离散表达：**针对强温差与物性跃变导致的界面温度梯度估计不稳问题，研究能量方程在 SPH 框架下的离散计算方式，构建与界面几何一致的热通量评估方法，使两侧热通量与离散算子在同一权重体系下自洽；在不依赖平滑的前提下提高梯度估计稳定性，降低温度场数值振荡风险，为相变质量通量计算提供可靠输入。

**(2) 相变质量通量闭合与潜热守恒更新链路：**基于界面能量平衡关系，建立由界面热通量驱动的相变质量通量计算与闭合表达，在离散层面实现质量交换与潜热释放/吸收的守恒更新，抑制温度过冲、假相变与能量漂移；同时明确相变更新对局部密度、体积与状态量的更新顺序与耦合变量一致性要求，避免潜热重复计入与收支失衡的累积。

**(3) 相变更新与两相耦合推进的时间层协调：**研究相变质量/能量更新与压力求解、速度更新之间的耦合组织方式，将相变更新纳入统一时间层推进流程，给出与两相耦合推进相协调的更新顺序与源项处理策略，降低相变对压力-速度更新的扰动放大；通过典型相变算例对温度场、相变速率与能量收支进行一致性检验，形成可集成的相变闭合与守恒更新模块。

### **研究内容 3：体积剧变下粒子自适应重构的守恒实现与多时间尺度推进**

**(1) 体积剧变区域的粒子自适应触发与一致重构流程：**面向相变诱导体积膨胀导致的粒子稀疏与邻域退化，建立分裂/合并触发指标与重构流程，使粒子分辨率与邻域支撑在体积剧变过程中保持可控；重点约束相界面附近与相变活跃区的粒子表示质量，避免邻域退化引起界面通量计算失真并破坏相变闭合。

**(2) 分裂/合并后的守恒变量重分配与一致修正：**构建分裂/合并与重采样后的质量、动量与能量变量重分配方法，保证局部守恒并与界面耦合与

相变闭合的离散形式一致；通过一致重映射与必要的修正环节，减少重构引入的隐性质量/能量误差与压力扰动，避免潜热重复计量在重构过程中累积。

(3) 多时间尺度推进的组织与界面交换对齐：针对声学 CFL、热扩散与相变更新带来的多时间尺度约束，研究分层时间推进组织方式，建立气相子步与液相大步耦合推进的界面交换对齐策略，明确界面交换、相变更新与粒子重构的时间层协同安排，避免时序错配导致的相变速率波动与界面耦合不稳；并在体积剧变相变算例中检验推进效率与稳定裕度。

**研究内容间支撑关系：**三项研究以守恒一致更新流程为主线，两两耦合、相互约束，其关系如图 2 所示。研究内容 1 提供稳定的界面压力-速度传递与几何输入，支撑研究内容 2 的热通量评估与相变闭合。相变引起的质量/能量变化与体积膨胀将反向影响界面传递精度并触发粒子自适应需求，研究内容 3 通过守恒重分配与时间层对齐，约束并保障研究内容 1 与 2 在体积剧变条件下的稳定与一致。

### 3. 拟解决的关键科学问题

本项目拟解决的关键科学问题如下：

(1) **相界面物性跃变处压力-速度信息的稳定传递与界面耦合一致离散。**分离式两相 SPH 中，液相与气相推进策略不同，界面处需通过压力边界与速度约束实现双向耦合。在高密度比与邻域退化条件下，核支撑域截断与粒子扰动易放大界面离散误差，诱发压力振荡、寄生流与相间掺混，并导致稳定域收缩。**关键在于界面边界条件的离散构造与交换方式未与两相推进过程一致匹配**，界面误差易进入压力-速度更新并被持续放大。需要在受限核支撑与界面几何约束下，统一压力边界重构、速度约束施加与稳定化强度选取，使界面传递与推进算子保持同构一致。因此，本项目将构建与推进算子一致的界面边界离散与交换机制，形成可控的压力-速度稳定传递策略，为高密度比两相计算提供稳健界面耦合框架。

(2) **相变闭合与粒子自适应在统一离散框架下的守恒一致实现。**气液相变由界面热通量驱动，质量交换与潜热更新会反馈影响压力求解与速度更新；相变诱导的体积膨胀又会导致邻域退化并触发粒子重构需求。相变闭合、潜热守恒更新与粒子分裂/合并若分步实施，守恒误差与时间错配易累积，表现

为能量漂移、潜热重复计入或相变速率波动，并削弱整体稳定性。**关键在于相变更新与粒子拓扑重构未纳入统一守恒更新流程并实现时间对齐**，局部误差会反向扰动界面耦合稳定性。需要将热通量驱动的相变闭合、潜热守恒更新、分裂/合并后的变量重分配与多时间尺度界面交换纳入同一更新链路，避免守恒与时序错配的累积。因此，本项目将构建相变闭合与潜热守恒更新方法，并与粒子自适应重构及多时间尺度推进协同设计，实现体积剧变条件下相变两相流的稳定可靠计算。

## 4. 拟采取的研究方案

### 4.1 技术路线

验证算例：

**Yang[53]:** Stefan problem、Evaporation of a static drop、Evaporation of a drop impacting a hot surface

**Huang[45]:** This current research integrates SPH models of heat transfer, fluid dynamics, and phase transitions. 传热、传质、相变的模拟 Stefan problem, natural convection problems involving phase transitions, 对比实验或者有限元分析（主要是 COMSOL 的结果）

**Duan[50]:** 沸腾相变气液相变涉及到（1）高密度比和体积的（2）急剧膨胀问题。开发汽化或沸腾相变模型可以显著拓宽颗粒方法的应用范围。验证算例：rising bubble problem, Stefan problem, sucking problem, film boiling problem

### 4.2 研究方法

### 4.3 关键技术

## 5. 本研究特色创新之处

本项目面向低温相变换热等重大工程应用中的高可信数值模拟需求，针对强物性差异与相变诱导体积剧变条件下分离式两相 SPH 易出现压力速度耦合不稳、守恒误差累计与时序错配等问题，开展守恒一致性耦合算法研究。项目将构建“界面压力速度稳定耦合-热通量驱动相变守恒更新-体积剧变粒子守恒重构与多时间尺度对齐”的统一离散与时间层组织框架，形成可复现、可验证的模块化求解框架。预期可提升相变两相流 SPH 模拟的稳定性与守恒

一致性，为低温相变换热过程的数值分析与工程设计提供可靠的方法支撑。

**本项目的特色**在于以“守恒一致性更新流程”为主线，面向强物性跃变与相变诱导体积剧变工况，从方法论层面把界面耦合、相变更新与粒子自适应视为同一离散体系下的耦合约束。相较现有研究采用“模块化叠加”与“状态量交换”的弱耦合路线，本项目强调三者在离散层面相互反馈：界面离散会被推进链路放大，相变源项会改变压力约束与体积分布，拓扑重构又会改变邻域与几何输入，因此必须在统一口径下协同设计。本项目将通过统一的数据接口与时间层组织，把稳定性、守恒性与时序一致性作为同等约束同时落实，从而提升极端工况下 SPH 计算的可靠性与拓展性。

**本项目的创新之处**在于：面向极端耦合工况，将“界面耦合-相变更新-粒子重构”由经验修补的分布策略，提升为可检验的离散一致性构造。具体表现为：①由平滑/阻尼抑制转向压速传递离散相容性约束，使界面稳定性建立在离散结构匹配而非参数敏感性上；②由相变作为外加源项转向相变纳入守恒更新链路，在离散层面闭合质量交换与潜热收支，降低能量漂移与假相变；③由重构只保分辨率转向重构受守恒与时序双约束，将分裂/合并与多时间尺度推进对齐，避免拓扑操作反向破坏界面与相变计算。上述创新把方法的可靠性从调参可用推进到结构一致可复现，形成可推广的算法范式与通用模块。

## 6. 年度研究计划及预期研究结果

### 6.1 年度研究计划

本项目执行期限为三年（2027 年 1 月至 2029 年 12 月），年度研究计划如表 1 所示。

具体安排如下：

(1) 2027 年 1 月 ~ 2027 年 12 月

完成界面压力边界与速度约束的统一离散，构建邻域退化条件下界面力稳定化耦合策略，形成“界面交换—压力求解—速度更新”的一致推进框架并实现误差可控；构建非相变两相基准算例，完成稳定性、守恒一致性与收敛性对比验证；拟参加学术会议 1 次，发表高质量学术论文 1 篇。

(2) 2028 年 1 月 ~ 2028 年 12 月

完成界面热通量的稳定评估与离散，建立热通量驱动的相变闭合与潜热

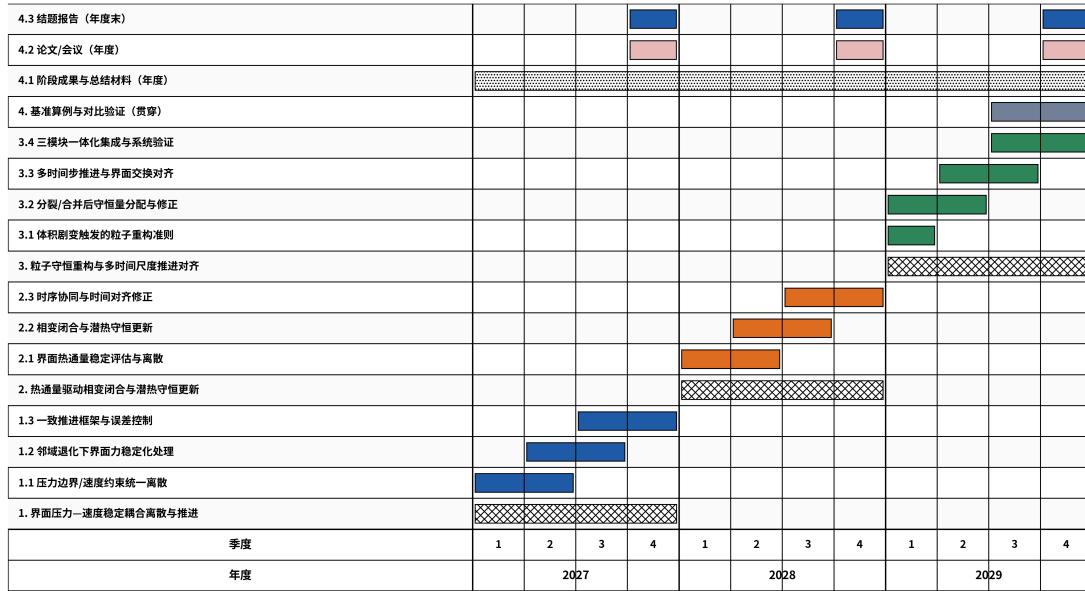


图 3. 本项目总体研究思路示意图

守恒更新方法；明确相变更新与界面推进的时序协同与必要修正环节，实现相变模块与界面推进框架的时间对齐与稳定耦合；在相变两相算例中开展质量/能量守恒与稳定性验证，给出相变闭合方法的适用范围与参数建议；拟参加学术会议 1-2 次，发表高质量学术论文 1-2 篇。

### (3) 2029 年 1 月 ~ 2029 年 12 月

建立体积剧变触发的粒子自适应重构准则，完成分裂/合并后的守恒量分配与修正方法，形成多时间尺度推进与界面交换对齐策略；完成三模块一体化集成，在综合算例中开展系统验证与定量对比评估；完成项目总结与结题报告撰写，凝练可复用算法模块与推荐参数区间；拟申请软件著作权 1-2 项，参加学术会议 1-2 次，发表高质量学术论文 1-2 篇，培养研究生 1 名。

## 6.2 预期研究成果

通过本项目的研究，预期取得以下成果：

- 构建界面压力速度稳定耦合离散方法，形成可复现代码与基准算例集；
- 建立热通量驱动的相变闭合与潜热守恒更新流程，完成守恒性验证；
- 提出体积剧变下粒子守恒重构与多时间尺度对齐策略，完成集成评估；
- 在国内外重要学术期刊或会议上发表学术论文 3-5 篇；
- 形成可复用程序原型与算法模块 1 套（可登记软件著作权 1-2 项）；
- 参加国内或国际会议 3-5 次；
- 培养硕士研究生 1 名。

### (三) 研究基础

1. 研究基础与可行性分析（与本项目相关的工作积累和已取得的研究工作成绩，研究风险的应对措施等）；

#### 1.1 研究基础

项目负责人长期从事 SPH 方法在水动力学、多物理场耦合及复杂自由界面问题中的算法研究与应用开发，在高精度 SPH 算法构建、自由液面追踪及流固耦合建模等方面已形成较为系统的研究基础。围绕数值一致性、稳定性与收敛性问题，先后开展多项方法改进研究，并在多类海洋流固耦合与复杂自由界面算例中得到验证，如图 3 所示，为本项目聚焦的跨介质入水数值稳定性问题提供了直接的方法与经验支撑。

项目负责人主持并主导开发了基于 SPH 方法的多物理场开源计算软件平台 SPHinXsys。该平台采用模块化架构设计，支持粒子-网格混合建模及 CPU/GPU 并行计算，如图 6 所示，已成功应用于复杂边界处理、水弹相互作用、多刚体动力学耦合及流固热耦合等多类问题，具有良好的稳定性与可扩展性。项目组具备从算法设计、程序实现到算例验证与平台集成的完整技术能力，可为本项目中多种稳定性改进算法的实现与对比验证提供统一、可靠的软件支撑。

#### 1.2 可行性分析

路线 A 可用于宏观两相分布与传热趋势预测，但在液氢/氢气强物性比与强温差条件下，界面厚度与物性平滑会引入额外模型参数，使相变通量与表面张力平衡对数值正则化敏感；因此本项目选择路线 B，以尖锐界面分离式耦合在离散层面构建热力学一致闭合与多时间尺度可计算框架。

沸腾相变的难点不只在流场，更在热/质传递离散的稳定性与收敛性；已有多物理 SPH 工作通过 Stefan/自然对流等基准验证了热-相变模块的可靠实现，为本项目构建更复杂气液相变框架提供方法基础。

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、全国重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

待补充

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人正在承担

的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的资助机构、项目类别、批准号、项目名称、获资助金额、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

无

4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已资助期满的科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该项目的研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果详细目录）。

无

#### （四）其他需要说明的情况

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系；已收到自然科学基金委不予受理或不予资助决定的，无需列出）。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 同年以不同专业技术职务（职称）申请或参与申请科学基金项目的情况（应详细说明原因）。

无

5. 其他。

无