Modeling and Simulation 建模与仿真, 2025, 14(4), 139-150
Published Online April 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2025.144272

Hans汉斯

SPH法与欧拉法在空间堆撞击水体中的对比研究

徐达伟

中国原子能科学研究院核工程设计研究所，北京

收稿日期：2025年3月7日；录用日期：2025年3月31日；发布日期：2025年4月9日

摘　要

随着我国航空技术的发展，深空探测、星表基地等任务需求逐渐进入视野，空间堆的重要性愈发显著。而空间堆发射跌落撞击地表问题是空间堆安全设计的核心内容，当空间堆高速撞击水体时，极高的速度与巨大的冲击力使得堆本体与自由液面发生剧烈变形，极大增加了流固耦合的复杂性，使得基于传统拉格朗日网格的有限元方法难以得到正确解答。本文通过建立空间堆整体几何模型，定义适用于高速撞击时的材料本构模型和状态方程模型，基于光滑粒子流体动力学(SPH法)以及欧拉法进行空间堆撞击水体有限元仿真分析，具体对反应堆以200 m/s、50 m/s等速度以及正面、45˚、侧面等角度撞击水体进行模拟计算，对比了两种方法的计算结果及计算效率，得到了可信的结构破坏结果与危险工况分析。本文高速撞击水体的有限元模拟方法可为相关研究提供有益的参考，结构破坏结果可为空间堆发射跌落事故安全分析提供重要依据。

关键词

空间堆，SPH方法，本构模型，失效准则，空间核安全

A Comparative Study of SPH and Eulerian Methods for Space Reactor Water Impact

Dawei Xu

Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 9th, 2025

Abstract

With the advancement of aerospace technology in China, mission requirements such as deep space

文章引用: 徐达伟. SPH 法与欧拉法在空间堆撞击水体中的对比研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 139-150.
DOI: 10.12677/mos.2025.144272

exploration and extraterrestrial surface bases have gradually come into focus, highlighting the significance of space nuclear reactors. The issue of space reactor impact upon launch failure and subsequent collision with the Earth's surface is a critical aspect of space reactor safety design. When a space reactor impacts a body of water at high velocity, the extreme speed and substantial impact force cause severe deformation of both the reactor structure and the free liquid surface, significantly increasing the complexity of fluid-structure interaction. This complexity renders traditional Lagrangian mesh-based finite element methods inadequate for obtaining accurate solutions. This study constructs a comprehensive geometric model of the space reactor, defines material constitutive models and equations of state suitable for high-velocity impact scenarios, and conducts finite element simulation analysis of the reactor's impact on water using both the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method and the Eulerian method. Specifically, simulations are performed for reactor impacts at velocities of 200 m/s, 50 m/s, and at angles of 0˚ (head-on), 45˚, and 90˚ (side-on). The computational results and efficiency of the two methods are compared, yielding credible structural failure outcomes and hazardous scenario analyses. The finite element simulation methodology for high-velocity water impact presented in this study provides valuable references for related research, and the structural failure results offer important insights for the safety analysis of space reactor launch failure accidents.

Keywords

Space Reactor, SPH Method, Constitutive Model, Fracture Criterion, Space Nuclear Security

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着人类科技水平的提高，太空探索逐渐成为未来各国新的发展方向，目前航天多以化学能、太阳能为主要能源。但化学能受质量和体积的限制、太阳能受光照影响，均无法满足太空探索的需要。空间堆具有寿命长、不依赖太阳光照、能量密度高等特点。因此，核能在航天领域有着广阔的应用前景[1]。

然而受到尺寸及重量的限制，空间堆无法做到与地面核设施同等的冗余性和多样性。同时空间堆一旦发生事故将影响更为恶劣。截至目前，已经开展的空间核动力源应用中共发生了 9 次核事故。其中最为严重的是 1978 年苏联的“宇宙-954 号”(SPACE-954)坠落在加拿大，引起了世界各国对空间核动力应用安全的高度关注[2]。海洋占据了地球表面约 71%的面积，当反应堆于发射后期或在轨期阶段坠落后有很大可能落入海洋。因此，对空间堆撞击水体问题的研究具有重要意义。

目前国内外对空间堆撞击水体研究开展较少，由于空间堆跌落实验不现实，研究主要从理论研究及仿真模拟两个方面开展。理论研究集中在计算空间堆在各工况下的 k_{eff}，安伟健等[3]针对 Kilopower 空间堆研究了其在堆芯被水体侵入等工况下的 k_{eff}，发现在水体侵入时空间堆可能达到瞬发超临界状态。肖启冬等[4]针对 TOPAZ-II 空间堆(Thermionic Operational Reactor in Power Assembly-II)进行了特殊临界安全分析，基于实验数据给出了 TOPAZ-II 空间堆掉落后的最危险事故情景。仿真模拟方面，国外 Kim 等[5]建立了空间反应堆高速撞击地面的流体力学模型，对反应堆以 230 m/s 和 150 m/s 的速度撞击干砂的工况进行了计算并得到了相应的破坏结果。

理论分析只能分析简单假设下的空间堆反应性，无法包络空间堆撞击水体后的各种破坏结果，仿真模拟则暂无对空间堆撞击水体的相关研究，而 SPH 法已广泛应用于解决入水问题，丁宁等[6]基于 SPH 法

对返回舱的入水过程进行模拟。结果表明，SPH 法能够较好地模拟返回舱入水过程。高英杰等[7]采用 SPH 法进行 100 m/s 初速度条件下回转体垂直入水数值计算并对方法的有效性进行验证。证实 SPH 法可以有效解决入水冲击流固耦合数值仿真中的计算适应性问题。综合上述分析，目前已有研究未涉及空间堆撞击水体问题，因此本文通过 SPH 法与欧拉法，以 TOPAZ-II 型空间堆结构为参考研究空间堆高速撞击水体问题。

2. 计算模型

2.1. 几何模型及网格划分

1975 年，前苏联开发基于热离子系统的 TOPAZ-II 型空间核反应堆电源[8]，该空间堆以 UO_2 为燃料，NaK 液态金属为冷却剂。TOPAZ-II 堆的堆芯由热离子燃料元件、氢化锆慢化剂、端部铍反射层、侧铍反射层、12 个控制鼓以及堆容器等组成，本文反应堆以 TOPAZ-II 堆为基础进行适当简化，其横截面和剖视图如图 1 所示。

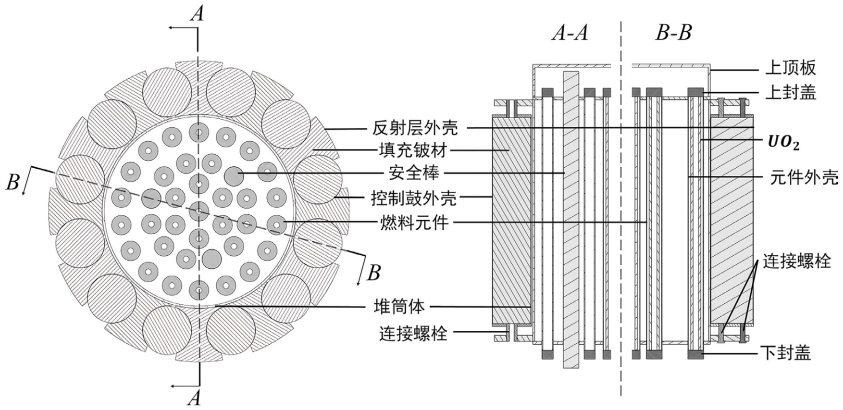

Figure 1. Space reactor sectional view and cross section
图 1. 空间堆横截面和剖视图

空间堆由多个部件组成，其主体结构材料为 2A12 铝合金，反射层、控制鼓筒体材料为不锈钢，填充为铍材，安全棒材料为 B_4C，燃料元件内层材料为 UO_2，外层材料为不锈钢。

堆本体有限元模型如图 2 所示。堆芯筒体、安全棒套管及反射层、控制鼓外壳采用壳单元，单元类型为 S4R。其余部件均为实体单元，单元类型为 C3D8R。反应堆有限元模型单元总数为 475,636，结点总数为 698,944。

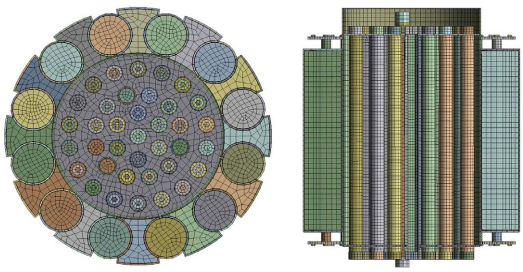

Figure 2. Finite element model of space reactor
图 2. 空间堆有限元模型

燃料元件简化为内外两层及上下封盖，外层材料为不锈钢；内层材料为 UO_2。反应堆筒体与栅板及上下封盖均绑定连接。燃料元件外层与上下栅板绑定连接。连接螺栓分别将反射层、控制鼓与上下栅板连接，螺栓不施加预紧力。

2.2. SPH 方法基本理论

SPH 方法基于粒子，求解问题的本质就是选择合适的光滑核函数(插值函数)进行插值的过程. 对于任意未知函数，用下式来近似 x 处的函数值：

$$f(x)\approx\int_{\Omega}f(x')\delta(x-x')\mathrm{d}x' \tag{1}$$

式中：$f(x)$ 为三维坐标向量 x 的函数；Ω 为包含 x 的积分域；$\delta(x-x')$ 为狄拉克 δ 函数，具有如下性质：

$$\delta(x-x')=\begin{cases}\infty, & x=x'\\ 0, & x\neq x'\end{cases} \tag{2}$$

通过将 $\delta(x-x')$ 替换成核函数 $W(x-x',h)$ 可得到场函数的核近似表达式

$$\langle f(x)\rangle\approx\int_{\Omega}f(x')W(x-x',h)\mathrm{d}x' \tag{3}$$

式中：x 为计算点处的位置向量，x' 为问题域内其他点的位置向量，$\mathrm{d}x'$ 为 x' 点处微元体的体积，h 为光滑长度，Ω 为计算点处核函数的支持域。粒子近似法是粒子叠加求和相对应的离散化过程，对粒子的求解与光滑函数有关，通过其支持域内的粒子表达式来进行求解，在粒子处的函数粒子近似式可用下式表达：

$$\langle f(x)\rangle=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{p_i}f(x_j)\cdot W_{ij} \tag{4}$$

式中：N 为搜索域内的粒子总数，m_j 和 ρ_j 分别表示对粒子 i 作用的粒子 j 的质量和密度，W_{ij} 表示粒子 j 对粒子 i 产生影响的光滑函数。对式 4 求导得：

$$\langle\nabla\cdot f(x)\rangle=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{p_j}f(x_j)\cdot\nabla_i W_{ij} \tag{5}$$

用 SPH 方法离散后得到的控制方程表示如下：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}=\rho_i\sum\limits_{j=1}^{N}\dfrac{m_j}{\rho_j}v_{ij}^{\beta}\dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}\\ \dfrac{\mathrm{d}v_i^{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\sum\limits_{j=1}^{N}m_j\left(\dfrac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2}+\dfrac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2}\right)\dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}\\ \dfrac{\mathrm{d}u^{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{j=1}^{N}m_j\left(\dfrac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2}+\dfrac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2}\right)v_{ij}^{\alpha}\dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}\end{cases} \tag{6}$$

2.3. 工况设计及假设

空间堆撞击水体时的速度、角度受多种因素影响，包括事故发生时的发射阶段、初速度及再入大气层过程中的烧蚀作用等，美国对同位素电池(RHU)开展过相关跌落实验，4 种试件的平均碰撞速度分别为：93.9、95.1、123.4 和 81.7 m/s [9]，而发射前空间堆自火箭端跌落时可视为自由落地，计算得初速度在 25~40 m/s 区间内，同时当撞击速度高于 200 m/s 时根据以往火箭发动机及一级、二级火箭掉落经验，认为堆体完全失效，即不存在临界风险。

因此，根据以上对空间堆发射各阶段可能发生事故情况的分析，将撞击地面初速度设定为 25 m/s (可能发生撞击的最低速度)、200 m/s (对应极限工况)。反应堆撞击地面角度设定为 0˚、45˚、90˚，分别对应反应堆正面撞击、斜 45˚撞击以及侧面撞击。

2.4. 本构模型及失效模型

材料本构模型及失效准则对空间堆结构破坏有着很大影响，本文中使用 Johnson-Cook 本构模型、失效模型及 JH-2 模型对材料进行定义。Johnson-Cook 本构模型于上个世纪八十年代提出，主要用于描述材料在高应变率、大应变以及不同环境温度下的力学性能。该模型通过大量实验提出，广泛应用于鸟撞击实验、汽车碰撞、霍普金森杆等冲击领域。Johnson-Cook 模型的特点是形式简单，同时考虑了应变硬化、应变率强化以及温度软化效应的影响，Johnson-Cook 本构模型可表示为：

$$\bar{\sigma}=\left[A+B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right]\left[1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*}\right]\left[1-\left(\frac{T-T_r}{T_{\text{melt}}-T_r}\right)^{m}\right] \tag{7}$$

其中，A 为参考应变率和参考温度下的初始屈服应力；B，n 为材料应变硬化模量和硬化指数；C 为材料应变率强化参数；$\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^{*}$ 为无量纲化等效塑性应变率；T_r 为室温；T_{melt} 为融化温度；M 为温度软化指数，本文中不考虑该效应。

Johnson-Cook 失效准则考虑到应力三轴度、温度以及应变率效应：

$$\varepsilon_{\text{f}}=\left[D_1+D_2\exp\left(D_3\sigma^{*}\right)\right]\left(1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^{*}\right)\left(1+D_5T^{*}\right) \tag{8}$$

其中，$D_1 \sim D_5$ 为材料参数；σ^{*} 为应力三轴度，$\dot{\varepsilon}^{*}$ 为等效塑性应变率；T^{*} 为无量纲温度参数。J-C 失效准则假设，损伤变量初始为 0，材料在变量积累达到 1 时失效。损伤变量定义为 $D=\sum\left(\Delta\varepsilon_{eq}/\varepsilon_{f}\right)$，$\Delta\varepsilon_{\text{eq}}$ 为一个时间步的等效塑性应变增量。

本文中堆容器主体结构材料 2A12 铝合金[10]、不锈钢外壳[11]及螺栓材料[12]使用 Johnson-Cook 本构模型、失效模型，Be 本构方程为 Johnson-Cook 模型，失效模型为最大主应力失效模型，失效应力为 460 Mpa [13]，以上材料输入参数均来自相关文献中对对应材料的实验及参数拟合[10]-[13]，数值列于表 1。

Table 1. Materials and functions of each component
表 1. 各组成部件材料输入参数

材料	密度 (kg/m^3)	弹性模量 (GPa)	泊松比	A (MPa)	B (MPa)	n	C	D1	D2	D3	D4	D5
2A12	2770	71.7	0.33	400	635	0.35	0.001	0.116	0.211	−2.172	0.012	0
316L	7900	193	0.27	328	1310	0.74	0.059	0.47	4.8	6.8	−0.0182	0
碳素钢	7830	80	0.3	350	320	0.28	0.064	0.3	0.72	1.66	0	0
Be	1855	300	0.28	438	300	0.85	0.015	/	/	/	/	/

B_4C 安全棒材料陶瓷具有较高的热中子吸收能力，常用于反应堆的控制棒材料，其本构及失效模型采用 JH-2 本构模型。

JH-2 理论模型是一种专门用于表征脆性材料断裂行为的本构模型。该模型通过强度模型、损伤演化模型以及静水压力－体积应变状态方程三个核心组成部分，系统描述了脆性材料在受力过程中的弹性变形阶段、塑性软化阶段以及最终的脆性断裂阶段。

强度模型表示如下：

$$\begin{cases} \sigma^* = \sigma_i^* - D\left(\sigma_i^* - \sigma_f^*\right) \\ \sigma_i^* = A\left(P^* + T^*\right)^N \left(1 + C\ln\dfrac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \\ \sigma_f^* = B\left(P^*\right)^M \left(1 + C\ln\dfrac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \end{cases} \tag{9}$$

其中：σ^* 为材料当前标准化等效应力；σ_i^* 为材料初始状态下标准化完整等效应力；σ_f^* 为材料破碎后标准化断裂等效应力；D 为损伤因子($0 \le D \le 1$)；A，N，B，M，C 为材料常数，可通过材料断裂等实验获得，这里取值分别为 0.927，0.67，0.7，0.85，0.005。P^* 为标准化静水压力，$P^* = P/P_{\mathrm{HEL}}$，P 为材料实际静水压力，P_{HEL} 为 HEL 处压力分量，取值为 8.71 GPa；T^* 为最大标准化净拉伸强度，取值为 0.2；$\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率，取 1 s^{-1} [14]。

B_4C 模型其他参数如下，密度为 2510 kg/m^3，剪切模量为 197 GPa，最大拉伸强度 T 为 0.26 GPa，Hugoniot 弹性极限 HEL 为 8.71 GPa [14]。

水体使用 us-up 状态方程定义，参数如下，密度为 1000 kg/m^3，c0 = 1450，s、Gamma0 均为 0，动力粘度为 0.001。

3. 计算结果分析

欧拉法利用 abaqus 软件进行计算，SPH 法利用 ansys/dyna 软件进行计算。二者区别在于水体的网格，欧拉法需要建立水体域与空气域，计算网格固定在空间中，不随物体运动，而材料相对于网格运动。SPH 法中，水体网格被转化为粒子从而避免了严重的单元变形问题。两种方法使用的空间堆有限元模型相同。

3.1. 欧拉法撞击水体过程

欧拉法水体模型高 6 m，长宽为 5 m × 5 m，水体及空气域各高 3 m，有限元模型如图 3 所示。空间堆初始条件下位于空气域水平方向的正中位置，距液气分界线 5 mm。空气域与水体域网格尺寸中心加密以提高计算的精确度。水体边界无约束。

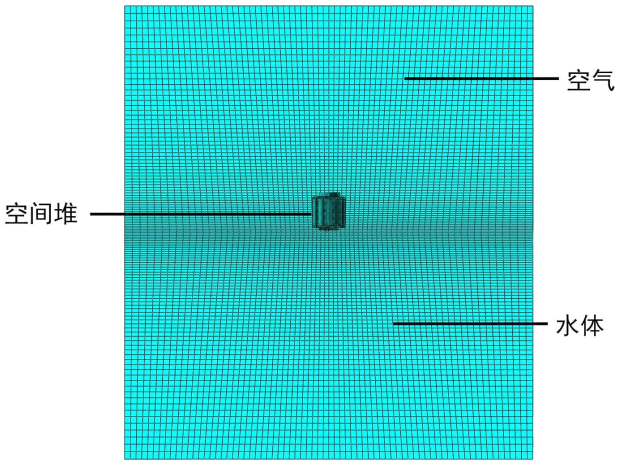

Figure 3. Eulerian mesh for water domain
图 3. 欧拉法水域网格

图 4 所示为欧拉法空间堆 200 m/s，0˚撞击水体过程，安全棒首先接触水体，由于安全棒为脆性材料，接触后即破碎，在 0.4 ms 内下裙板及螺栓在撞击水体后失效，同时填充铍材的外层不锈钢壳也失去包裹作用；2.4 ms 内空间堆持续下沉，反射层及安全鼓失去下部固定约束向外运动；4 ms 时空间堆保持向下运动趋势但破坏效应基本结束，内部燃料元件散落，无临界风险。

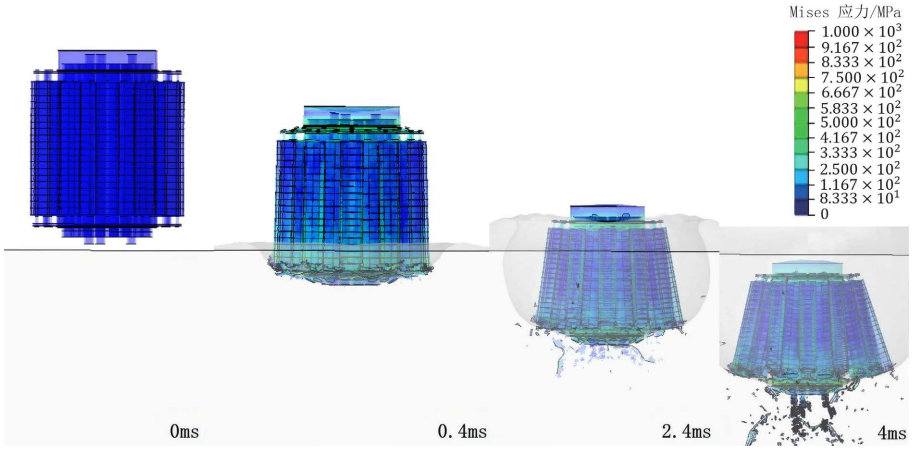

Figure 4. Stress contours of space reactor impacting water at 200 m/s and 0˚ using the eulerian method
图 4. 空间堆 200 m/s，0˚欧拉法撞击水体应力云图

图 5 所示为 45˚下空间堆以 200 m/s 撞击水体过程。0.8 ms 内安全棒下端首先接触水体并从中间折断，下裙板及螺栓接触水面随即发生形变并破坏，同时空间堆在水体接触力作用下发生转动，空间堆与水面夹角减小，上栅板接触水面并轻微破坏；2.4 ms 内空间堆下栅板与筒体部分破坏，燃料元件接触水体并变形；4 ms 空间堆完全进入水体，动能大部分被水体吸收，空间堆破坏效应基本完成，近地侧反射层与控制鼓完全失去螺栓约束开始与空间堆分离。

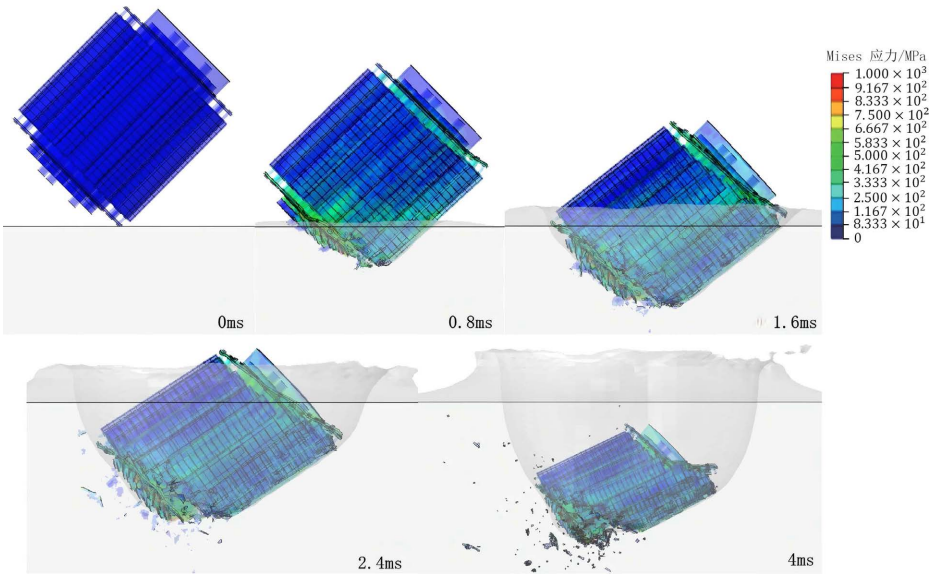

Figure 5. Stress contours of space reactor impacting water at 200 m/s and 45˚ using the eulerian method
图 5. 空间堆 200 m/s，45˚欧拉法撞击水体应力云图

图 6 为 90˚下空间堆撞击水体过程，0.4 ms 内空间堆侧面先撞击水体，上下裙板撞击水面后弯曲变形，与筒体连接处失效；2.4 ms 内空间堆完全进入水体，部分螺栓破坏失效，但仍随着空间堆向下运动；4 ms 内三根安全棒中近地端安全棒从中部折断，其余两根部分破坏。

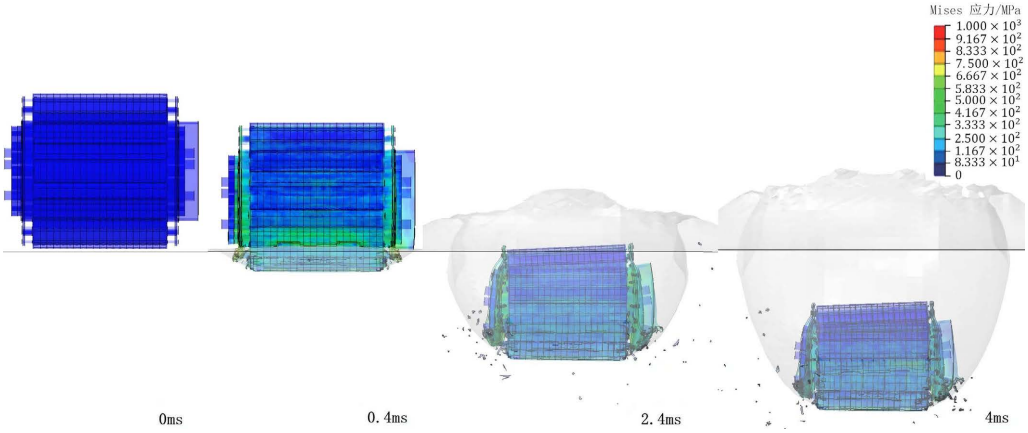

Figure 6. Stress contours of space reactor impacting water at 200 m/s and 90˚ using the eulerian method
图 6. 空间堆 200 m/s，90˚欧拉法撞击水体应力云图

50 m/s 下三个角度对应的空间堆损伤情况都很轻微，各角度对应空间堆损伤情况如图 7 所示。空间堆筒体、反射层、燃料元件都未出现失效单元，损伤集中在安全棒、螺栓及下裙板。0˚时下裙板变形，裙板边缘破坏，安全棒最外端撞击水体后破坏但未折断；45˚时裙板撞击水体侧破坏，安全棒下端断裂，下层近水侧螺栓失效但反射层受上端螺栓约束未脱离空间堆；90˚时由于空间堆侧面首先与水体接触且侧面的反射层强度较高，故仅有个别螺栓及反射层不锈钢外壳出现破坏，其余部件完好。

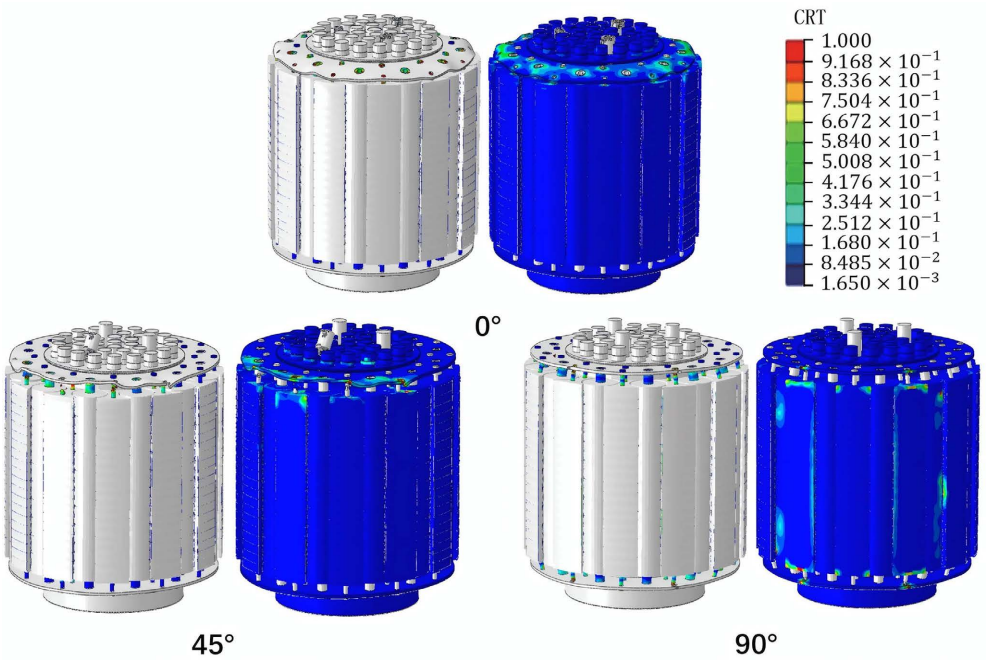

Figure 7. Damage contours of space reactor impacting water at 50 m/s with different angles
图 7. 50 m/s 下不同角度空间堆撞击水体损伤云图

3.2. SPH 法撞击水体过程

SPH 法将整个水体转化为粒子，为了提高计算效率本文将水体分为内层及外层两个区域，内层尺寸为 1 m × 1 m × 3 m，内层粒子位于空间堆撞击方向上，尺寸加密为 20 mm，外层粒子尺寸设置为 65 mm，水体边界无约束。图 8 为 SPH 法水体有限元模型。

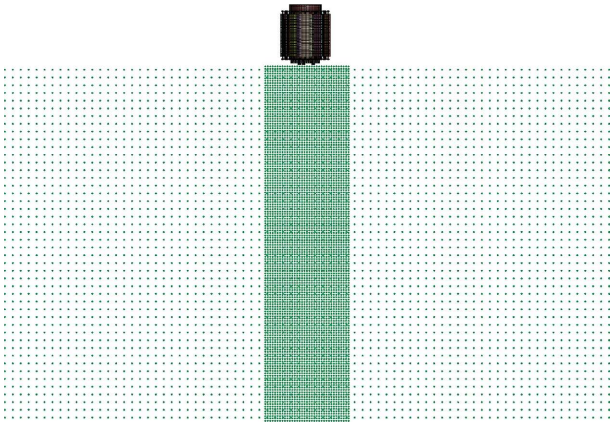

Figure 8. Finite element model of water impact using SPH method
图 8. SPH 法撞击水体有限元模型

图 9 为空间堆以 200 m/s 各角度撞击水体过程。垂直撞击时空间堆运动过程与欧拉法相似，但结构破坏情况有很大不同，在 2.4 ms 后空间堆完全进入水体，欧拉法模拟中空间堆上封盖未受到水体冲击保持完好，而 SPH 法中空间堆上封盖受到水体粒子冲击破坏。45˚撞击水体模拟中两种方法过程及破坏情况相似，4 ms 后空间堆下裙板及筒体失效，水体进入空间堆。水平撞击水体过程，当空间堆与液面接触后，空间堆周围附近液面有所上升。随着空间堆进入水体继续向下运动，空泡开始形成并扩张，空泡长度逐渐增长。4 ms 内上封盖及下裙板破坏，残余部分飞出，燃料元件变形，反射层、控制鼓未脱离。

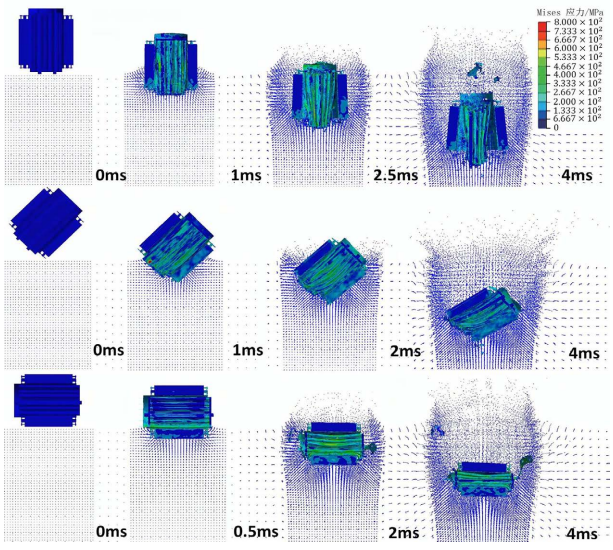

Figure 9. Stress contours of space reactor impacting water at 200 m/s with different angles using the SPH method
图 9. 空间堆 SPH 法 200 m/s 各角度撞击水体应力云图

图 10 为空间堆以 50 m/s 撞击水体结果。图 10 中可以看出空间堆在此速度下撞击水体时破坏非常轻微且 45˚倾角撞击时的整体应力相对更高。与欧拉法对比，0˚时裙板均出现了较大变形，45˚时安全棒下端均发生了断裂，90˚时空间堆破坏均较为轻微。因此在此速度下两种方法的模拟结果相近。

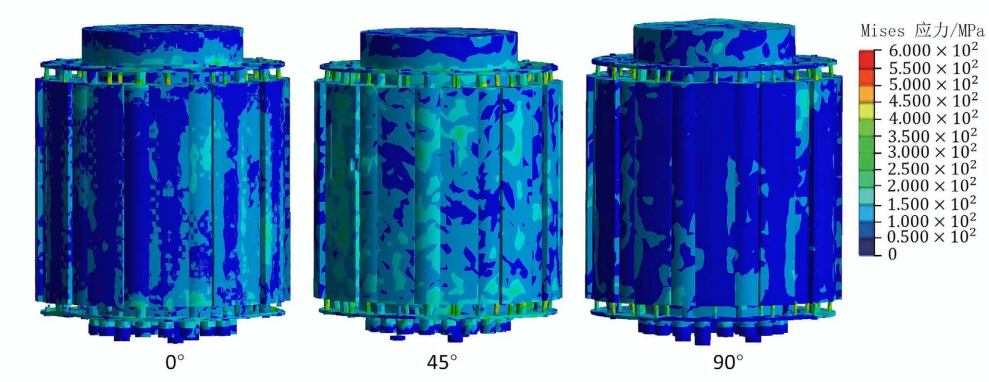

Figure 10. Stress contours of space reactor impacting water at 50 m/s and 1 ms with different angles
图 10. 空间堆以 50 m/s 各角度下撞击水体 1 ms 时应力云图

3.3. 两种方法对比

从本节计算结果中可以看出，低速撞击时欧拉法与 SPH 法计算结果区别不明显而高速撞击时两者对应结果有着较大差异，需要确认哪种方法更适用于解决本问题。本文选用空间堆模型外形为圆柱形，因此参考有关圆柱体入水文献中的相关研究，本文两种方法的计算结果与文献进行比较如下。

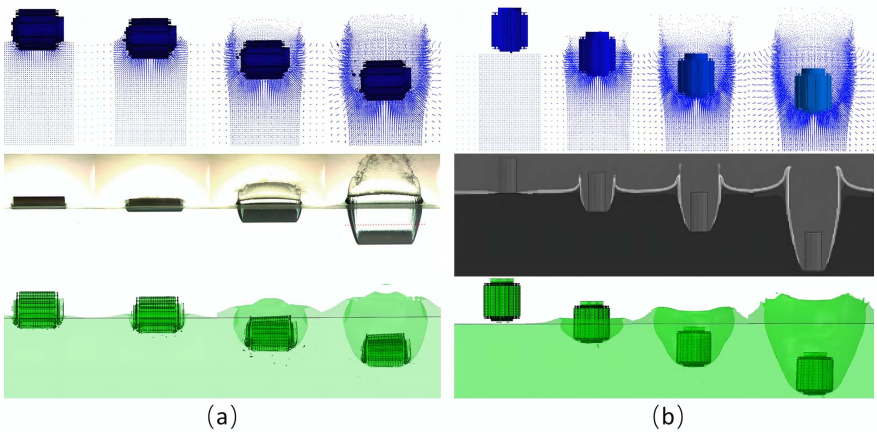

Figure 11. Comparison of the process of a cylinder entering water [15] [16]
图 11. 圆柱体入水过程对比[15] [16]

如图 11 为空间堆撞击水体过程对比，第一行为 SPH 法，第二行为文献中的撞击过程，第三行为欧拉法撞击过程。图 11(a)为圆柱体低速水平撞击水体过程，图 11(b)为圆柱体 100 m/s 垂直入水过程，观察液面空泡轮廓及溅起水体形状可以发现，SPH 法仿真结果与实验结果相近，欧拉法受限于网格无法准确模拟空间堆入水过程。

表 2 中列出了 0˚下两种仿真方法对应沙漏能及计算时间，通过对比可以发现 SPH 法具有计算效率高、计算过程产生沙漏能低的优点。综合以上比较，认为选用 SPH 法模拟水体更为适合。

Table 2. Comparison of hourglass energy and computation time corresponding to two simulation methods at 0˚
表 2. 0˚下两种仿真方法对应沙漏能及计算时间对比

仿真方法	速度(m/s)	计算时长(ms)	沙漏能(J)	计算时间(h)
欧拉法	50	10	4529.37	23.2
	200	4	51423.6	10.4
SPH 法	50	10	514.5	7.1
	200	4	5561.1	3.94

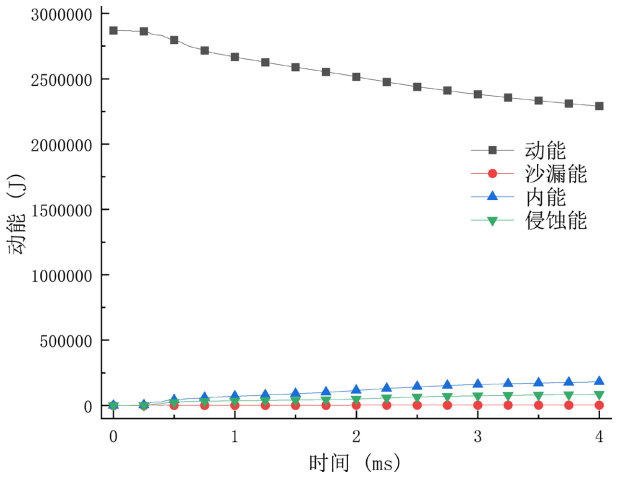

Figure 12. The energy variation curve of space reactor impacting water body horizontally at 200 m/s
图 12. 空间堆以 200 m/s 水平撞击水体能量变化曲线

图 12 为 200 m/s 水平撞击时的能量变化曲线，可以看出沙漏能占动能比例远低于 5%，即沙漏能对仿真结果影响不大且空间堆撞击水体 4 ms 时侵蚀能及内能基本稳定，即破坏效应基本完成。

4. 结论

本章在 abaqus 软件及 ansys/dyna 软件中使用欧拉法及 SPH 法两种方法分别在 0˚、45˚、90˚三个角度及 50 m/s、200 m/s 两个速度下对空间堆撞击水体过程进行了模拟仿真。对比仿真结果并参考相关实验及文献中圆柱体入水过程认为 SPH 法相对欧拉法更适用于解决空间堆撞击水体问题，因此选用 SPH 法对运动参数在空间堆撞击水体过程中的影响进行了分析，得到以下结论：

欧拉法及 SPH 法对于接触面(空间堆底部)的模拟都能做到较为准确，但欧拉法对于不规则、自由、复杂边界问题受限于水体网格无法准确模拟。

SPH 法相对于欧拉法有着更高的计算效率与更低的沙漏能，计算结果更为贴合实际，因此 SPH 法更适于解决空间堆撞击水体问题。

随着撞击速度的提高，空间堆破坏程度逐渐加深。低速撞击水体时反应堆基本保持完好；高速撞击水体时，45˚撞击时结构破坏最严重，0˚时次之，90˚时结构破坏最轻。

参考文献

[1] 周彪, 吉宇, 孙俊, 孙玉良. 空间核反应堆电源需求分析研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(10): 1912-1923.

[2] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.

[3] 安伟健, 郭键, 葛攀和, 高剑. Kilopower 空间堆掉落事故临界安全问题研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(3): 447-453.

[4] 肖启冬, 杨历军, 张鹏展, 刘凯凯, 刘洋, 刘东海, 吕征. TOPAZ-II空间堆特殊临界安全分析[J]. 原子能科学技术, 2024(12): 2563-2569.

[5] Kim, S.H. and Flanagan, G.F. (2009) Impact Analysis for Candidate Space Reactor Core Concept Designs for Potential Criticality Study. *Nuclear Technology*, **166**, 230-239. https://doi.org/10.13182/nt09-a8837

[6] 丁宁, 王鑫博. 基于 SPH 法的返回舱入水载荷模拟分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(6): 963-971.

[7] 高英杰, 刚旭皓. 基于 SPH-FEM 耦合方法的回转体高速入水数值研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(17): 6-11.

[8] Grinberg, E.I., Nikolaev, V.S., Usov, V.A., El-Genk, M.S. and Hoover, M.D. (1994) Aerodynamic Disruption of a Spacecraft and TOPAZ-2 System at Reentry. *AIP Conference Proceedings*, **301**, 895-898. https://doi.org/10.1063/1.2950286

[9] 胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 453-465.

[10] 张伟, 魏刚, 肖新科. 2A12 铝合金本构关系和失效模型[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 276-282.

[11] 余宏宇. 增材制造 316L 不锈钢高应变率动态失效行为研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2022.

[12] ANSYS Inc. (2013) ANSYS Autodyn User's Manual Version 15.0.

[13] 毕珊珊. 铍材材料本构关系研究及切削加工有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2019.

[14] 黄小忠, 孙娟, 杜作娟, 王庭江, 潘鉴. B4C 陶瓷/金属复合靶板抗侵彻性能数值模拟分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010(6): 91-93, 97.

[15] Wei, Z. and Hu, C. (2014) An Experimental Study on Water Entry of Horizontal Cylinders. *Journal of Marine Science and Technology*, **19**, 338-350. https://doi.org/10.1007/s00773-013-0252-z

[16] 苗圃, 祁晓斌, 王佳雯. 圆柱体高速入水数值模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(2): 1-5.