

基于栅格法的球床内流道六面体网格生成算法

摘要

高温气冷堆是第四代先进核能系统的优选堆型，其中关于球床堆芯内部的流动与传热研究不仅是高温气冷堆技术攻关的重要难题，也是学术研究的前沿热点。然而，球床堆芯中大量燃料元件的无序堆积形成了高度复杂的孔隙结构，这使得在计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）模拟中难以生成高质量的网格。传统的四面体网格虽然能够较好地适应复杂的几何形状，但需要大量的网格单元，导致计算成本显著增加；而六面体网格不仅能够提供更高的数值精度，还能显著减少网格数量，从而降低计算资源消耗。目前，鲜有针对球床内流道的高质量六面体网格自动生成算法，因此，本研究旨在开发一种有效的全六面体网格生成算法，以解决任意堆积球床中的网格生成难题，为高精度 CFD 模拟提供可靠的技术支持。

本研究提出了一种系统性的网格生成算法，该方法通过多个关键步骤确保网格质量。首先基于栅格法在计算域内生成初始的六面体核心网格。在这一步骤中，根据节点与几何边界的空间位置关系，将网格单元分类为内部单元、外部单元和边界单元，并移除位于计算域外部的单元和边界单元。然后，根据网格面与几何的位置关系，将几何边界映射到网格面上。最后，根据映射关系将网格面投影到几何边界的位置，形成新的网格，以实现计算域与流道几何域的完全一致。

由于核心网格的解析度有限，无法完全反映球床内流道所有几何特征。因此需要提出一种网格重构算法，以修复由堆积球床中存在的大量狭缝结构导致的网格失真问题。本研究基于 Paving 的面网格生成算法，对于颗粒-颗粒接触采用对称切平面网格划分策略，对于颗粒-壁面接触则采用了非对称椭圆面网格划分方法，成功重构了狭缝结构内部的网格。该方法有效解决了传统算法在接触区域容易产生低质量网格的问题。

为了进一步提升网格质量，本研究在核心网格与边界层网格间添加了过渡层网格。该技术通过计算相邻面法向量的加权和来确定每个边界节点的最优投影方向，同时根据节点到几何边界的最短距离动态调整投影长度，从而在几何边界处形成高质量的过渡层网格。

在网格优化方面，本研究采用了结合拉普拉斯平滑和基于雅可比矩阵优化的混合平滑算法。拉普拉斯平滑通过调整节点坐标来改善网格均匀性，而基于雅可比矩阵的优化则重点关注消除负体积单元，采用缩放雅可比（Scaled Jacobian）和形状度量（Shape Metric）等指标来评价优化过程。

通过系统的测试验证，本研究所提出的算法展现出较好的结果。在包含 25 种不同接触方向的测试案例中，生成的网格均未出现负体积单元，最差网格质量保持在 0.1 以上，平均网格质量均达到 0.85 以上。针对包含 10 个球体的实际应用案例，算法成功生成了约 60 万个高质量的六面体网格单元。与现有的 tet-to-hex 转换方法 [1,2] 相比，本算法在保持相同精度的前提下，将网格数量减少了约 30%，显著提高了计算效率。此外，算法还表现出良好的适应性，能够处理不同管径比和不同堆积密度的复杂情况。

本研究针对球床内流道开发了基于栅格法的六面体网格生成算法，结合核心网格与过渡层网格生成技术、接触处理策略和网格优化方法，成功解决了随机堆积球床中的网格生成难题。相比传统方法，该算法在网格质量、计算效率和适应性等方面都具有明显优势。实际测试表明，算法生成的网格可满足高精度 CFD 模拟的要求，为球床反应堆的热工水力分析提供了可靠的技术支持。未来研究将重点优化算法的并行计算性能，以适应更大规模的工程应用需求，同时将进一步发展自适应网格加密技术，以更好地捕捉边界层等关键流动特征。

关键词

计算流体力学；球床堆芯；六面体网格生成算法；网格优化算法；

Abstract

无

Keywords

无

Author: 桂桦, 赖

Co-author: 宏, 王

Presenter: 桂桦, 赖

Session Classification: 核能科学与工程

Track Classification: 03 口头报告: 核能科学与工程