烧蚀数值模拟中的计算域更新方法研究现状

吴海龙，韩海涛*，刘文君，邓代英，高俊杰，罗晓光，俞继军

（中国航天空气动力技术研究院，北京，100074）

1 引言

烧蚀广泛存在于高超声速飞行器热防护、再入飞行器头部防热和固体火箭发动机喷管等强热流环境，是材料表面持续退缩的移动边界多物理场问题；地面试验成本高、复现难、测量受限，高精度数值模拟成为重要手段。其计算域随边界推进不断收缩，具有单步退移小、累计退缩大的特点，易导致网格质量、边界表示、物理量映射和数值稳定性问题及误差累积。因此，高效稳定的计算域更新是保证模拟精度与工程可靠性的关键。

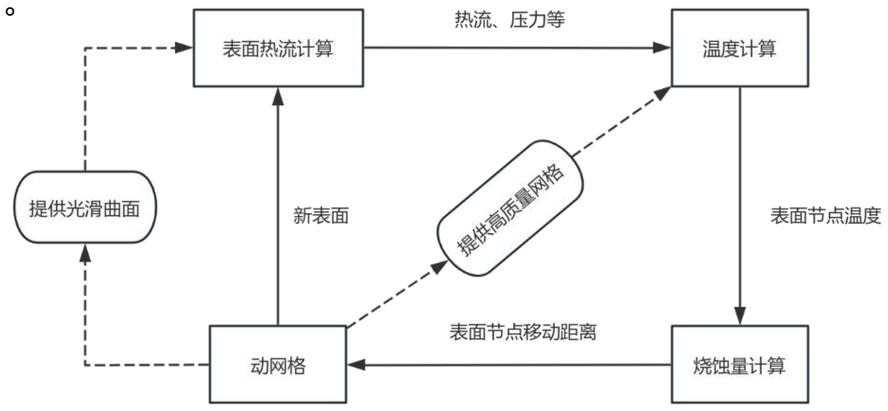


图1 烧蚀多物理耦合主要计算流程

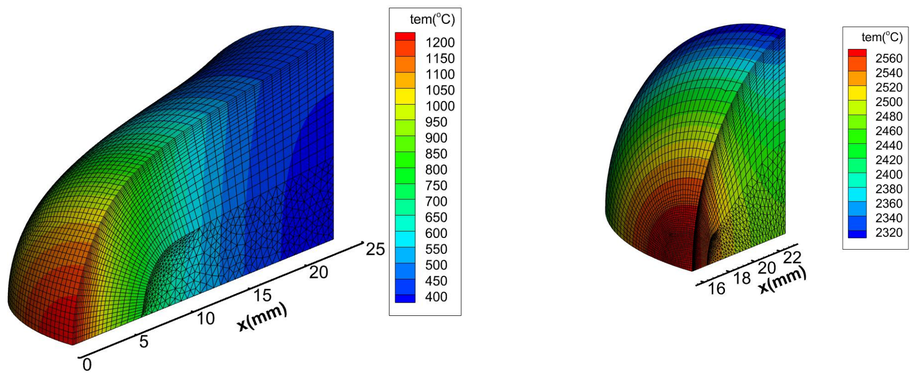


图2 球头圆柱模型烧蚀模拟前后示意图

2 烧蚀数值模拟中的常用计算域更新方法

2.1 网格变形方法

2.1.1 弹簧法

弹簧法把网格节点连接类比为弹簧网络，构造节点位移平衡方程；给定边界节点位移后，通过迭代求内部节点新位置，使边界位移平滑传播到内部。

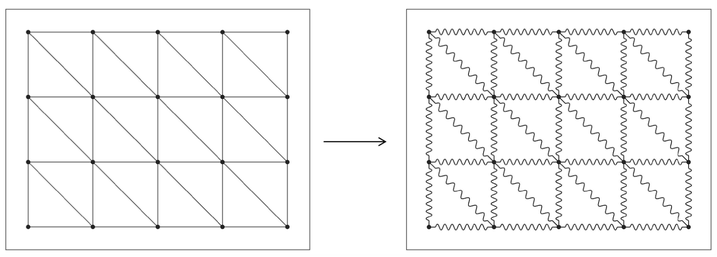


图3 弹簧法原理示意图

缺点是计算效率低，将网格变形的非线性问题假设为线性弹簧变形问题，单次大变形时，变形后的网格质量较差。优化方向是改进刚度模型、采用增量加载等，适合中小累计变形。

2.1.2径向基函数法

RBF法基于控制点（动边界节点）位移、控制点间距和所选基函数，先求各控制点权重，再按内部点到控制点的距离插值出内部节点位移，构造连续光滑的全局位移场，属于数学插值型网格变形。

本质上属于数学插值方法，计算效率一般优于弹簧法，但就方法本身而言，没有针对网格质量的优化路径，改进方向是精简控制点、加速矩阵求解，提高计算效率。长期大累计退缩下仍可能出现单元拉伸、扭曲甚至退化，大变形时通常需要和网格平滑或局部重构方法结合。

2.2网格重构方法

网格重构属拓扑改变型更新，通过局部区域再生，缓解网格畸变。更能适应大累计退缩，但拓扑改变后需重建离散关系并映射温度、材料等变量，会引入插值误差和额外计算成本。

（1）局部重构：针对网格质量恶化单元，先删除，再重生成合格单元，属按失效判据触发的被动修复。能消除局部严重退化，但难以从根本上解决计算域持续收缩导致的整体网格质量下降。

（2）生死单元：将进入退缩区域的单元切为失效，不依赖节点连续移动，对大边界退缩较稳定。但边界由整单元尺度近似，易呈阶梯状或锯齿状，影响边界法向获取、壁面热流等边界条件施加。

（3）分区重构：按边界运动影响范围分区，删除影响区内单元，保留边界节点，重新生成网格。保留大部分原始网格，适合烧蚀中连续边界退缩，但小变形时不如网格变形方法便捷。

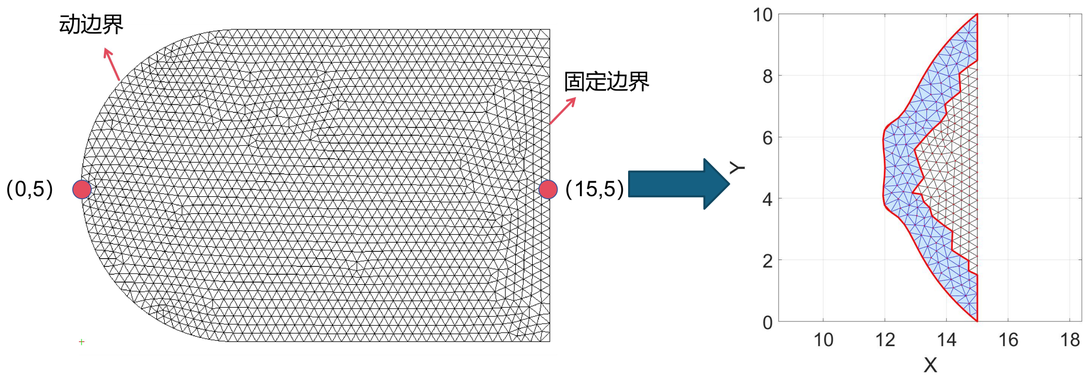


图4 分区重构法示意图

2.3无网格法

无网格法以粒子离散计算域，靠粒子移动、失效删除和邻域重构描述边界退缩：SPH表面按热化学模型退缩、内部由动量方程驱动；PD以键作用描述损伤断裂；固定粒子法用显式边界配固定背景点动态判定活跃点。存在边界识别与边界条件施加困难、邻域维护和计算成本高、精度对粒子分布敏感、边界截断误差及材料历史跟踪难等问题；优化方向包括边界修正，邻域搜索加速、自适应布点及网格—无网格混合等。

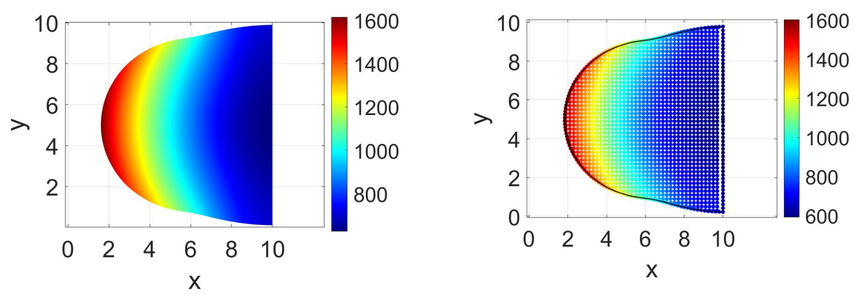


图5 烧蚀模拟中网格计算（左）与粒子计算（右）对比图

3 总结

	特点	优点/缺点	在烧蚀模拟中的应用情况
网格变形	节点连接关系不变	便于计算；大变形时网格质量不好	累积变形较小时
网格重构	节点连接关系可变	可支撑网格大变形；计算复杂	累积变形较大时
无网格	粒子之间无连接关系	无网格质量约束；精度有待提升	作为网格方法的补充