

# 流固耦合方法在心血管领域的应用

贺苏钰<sup>1</sup> 鲁敏翔<sup>2</sup> (通讯作者)

1 济宁医学院法学院, 山东济宁, 272067;

2 武汉大学中南医院法医司法鉴定所, 湖北武汉, 430062;

**摘要:** 心血管疾病是当前危害性最强、致死率最高的疾病之一。数值模拟在开展血流动力学、血管损伤与病理分析等机理性研究时具有独特优势。用数值方法须考虑血管弹性壁面与血液产生的耦合, 分析了多种流固耦合方法在心血管领域的应用。

**关键词:** 心血管疾病; 数值模拟; 流固耦合

**DOI:** 10.69979/3029-2808.26.03.060

## 引言

心血管疾病是中国人的首位死因。将计算机和数值方法模拟血流动力学用在理论分析和临床实验, 通过模拟演化过程及时空分布特征, 有利于揭示心血管病变机理、为诊断治疗及术前评估提供定性甚至定量指导。相较于实验手段, 数值模拟的优势在于能够提供经济高效、微观全面的预报, 流固耦合方法在心血管疾病研究中应用广泛。

## 1 流固耦合方法在心血管疾病的应用

流固耦合 (FSI) 主要由计算流体力学 (CFD) 与计算固体力学 (CSM) 两部分组成。动脉粥样硬化 (AS)、主动脉夹层 (AD) 和主动脉瘤 (AA) 是目前心血管领域的研究重点。AS 是心血管疾病的核心致病机理, 而主动脉疾病 AD 和 AA 是潜在的致命风险, 我国 2023 年住院率最高为 47.4%, 其次 AA 为 24.7%<sup>[1]</sup>。FSI 方法主要用于提供机理解释和对微观现象的洞察与理解, 使研究结论从对个别案例的总结分析上升至理论层面。

(1) AS 使动脉管壁增厚、管腔狭窄, 与血流动力学过程密切相关。FSI 评价指标是脉动压力、壁面剪切应力 (WSS)、振荡剪切指数 (OSI)、相对停留时间 (RRT) 等, 通过多模型、多工况对比等途径对 AS 的致病机理进行定性、定量分析, 整个 FSI 计算侧重于流场, 考虑弹性壁面的影响。

研究通过对比刚性壁与弹性壁条件的颈动脉模型, 发现刚性模型会高估血流速度与壁面剪切应力, 因此在使用数值方法研究 AS 时考虑流固耦合效应至关重要。流固耦合效应主要影响 WSS 指标的极值而非平均值, 建

模时关注血液的非牛顿流体性质的影响。通过 FSI 方法分析左冠状动脉的几何参数对血流动力学特性的影响, 较大的血管直径、特定的血管角度容易引起 AS。AS 斑块明显提高了 WSS 和 OSI 指标, 显著增加了致病概率, 如正常动脉中约有 8.3% 的区域处损伤风险范围内; 狭窄动脉中由于硬化斑块聚集, 致该比例上升至 20%<sup>[22]</sup>。对颈动脉窦的 FSI 计算揭示了相似的演化机理, 即窦部至颈内动脉区域的流速、WSS、OSI、RRT 等指标和血管应变明显增大, 表明粥样硬化和血管狭窄程度将进一步增加, 且颈动脉窦处有因硬化斑块破裂形成血栓的风险。分别在刚性壁面 (CFD) 与单向、双向 FSI 条件下, WSS 指标与冠状动脉斑块形成的关系, 可量化 12 种 WSS 衍生指标与血管重塑及斑块形态变化之间的联系, 同给出了基于 FSI 数据的 CFD 模拟结果修正表达式, 该成果可有效降低计算成本, 并为同类课题提供经验借鉴。基于 SPH 框架可实现并行 FSI 算法, 并对血管及主动脉的流固耦合过程进行建模计算, 比普通商业软件计算效率更高。

(2) AD 是主动脉瘤的特例, 血液通过破口进入动脉壁形成血肿, 剥离主动脉的内膜和中膜结构形成夹层。优先采用 FSI 方法进行研究, 数值计算强调对流-固耦合过程及其特性的模拟。

早期的数值计算大多采用刚性壁面条件, 忽略了内膜瓣运动对假腔内血流运动的影响, 而 FSI 的结果则表明, 内膜瓣的运动会在破口处诱发复杂涡系, 涡结构引起的高剪切力将加速血栓的形成, 通过 FSI 方法得出的血栓体积较刚性模型增大了 25%, 因此通过增加内膜瓣的弹性模量 (相当于提高内膜的刚度)、降低其振动

幅值有利减缓血栓生长。研究表明,涡结构分布区域的红细胞体积分数和时均 WSS 相对较低而 OSI 指数较高,为 AS 的形成提供了有利条件。FSI 模型与刚性模型的时均壁面剪切应力分布趋势相似,但振荡剪切指数分布在显著差异。基于任意拉格朗日-欧拉框架和隐式时间推进可实现有限元-流固耦合并行算法,在超算平台上的实测结果表明,新算法可将心跳周期的模拟时间缩短至 0.36 h,较常规商软有明显进步。用浸入边界法与格子玻尔兹曼方法可实现流固耦合计算,有效克服非牛顿流体特性和网格奇异带来的影响,同时使用的 GPU 并行计算也节约了模拟时间,另外考虑到三维 FSI 的计算成本相对较高,不利于开展多方案评估或优化,Keramati 等使用降阶技术构建了快速预报模型<sup>[31]</sup>,能够以极低计算成本反映心率变化对主动脉夹层血流动力学的影响,有望为术前规划提供技术支撑。

(3) AA 是动脉异常扩张、向外膨胀所致,因无明显症状而具备较强的隐蔽性,但若破裂可致生命危险。以 AA 直径和膨胀率是评估破裂风险的主要指标,AA 重视对血管应力、应变等力学状态的预报。

研究对比正常动脉、粥样硬化动脉及粥样硬化性动脉瘤等 3 类模型的流动特性,硬化斑块对血流动力学起到决定性影响,血管内流速和压力的变化,增加了动脉组织病理性重塑和诱发动脉瘤的风险。分析数值仿真中所施加的边界条件对力学结果的影响,得出对速度入口边界条件的过度简化可能导致 WSS 出现较大计算误差。为通过 FSI 模拟准确评估动脉瘤的破裂风险,要考虑动脉及血栓材料属性带来的不确定性,为此研究通过多模型和多工况对比开展研究,证明起决定性作用的因素是动脉瘤内的血栓体积,而材料属性对血管应力的影响相对有限。采用 3D 打印技术制作了物理模型,引入激光粒子测量技术(PIV)开展流场测量实验,结合 FSI 方法分析了动脉形变与动脉瘤内部的流动特征,这类采用真实物理模型与数值算法相融合的新范式,有望为针对特定患者的个性化研究提供借鉴。动脉瘤破裂风险的识别标准是基于临床数据重建的一百例动脉瘤模型,使用 FSI 方法详细分析了血流动力学条件、主动脉容积、主动脉曲率等因素的影响,通过与平均壁面应力的相关系数证明,相较于传统的直径评判标准,主动脉容积是一个可行的风险标识指标。基于动脉瘤直径的评价体系正逐渐被 FSI 预测指标所取代,当动脉瘤较小时,动脉瘤的形状参数主要对血流动力学指标产生影响;当动脉瘤

接近临界直径时,形状参数将对壁面应力产生显著影响,此时血管将出现破裂风险。

### 参考文献

- [1] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2024 概要[J]. 中国循环杂志, 2025, 40(6): 521-559. National Center for Cardiovascular Diseases, The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on Cardiovascular Health and Diseases in China 2024: an Updated Summary[J]. Chinese Circulation Journal, 2025, 40(06): 521-559.
- [2] Lopes D, Puga H, Teixeira J C, et al. Influence of arterial mechanical properties on carotid blood flow: Comparison of CFD and FSI studies[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 160: 209-218.
- [3] Shinde S, Mukhopadhyay S, Mukhopadhyay S. Investigation of flow in an idealized curved artery: comparative study using CFD and FSI with newtonian and non-newtonian fluids [J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 2022, 22(2).
- [4] Aryan H, Rasi M, Asiaei S. Numerical simulation of blood flow in 3D CT-based healthy and atherosclerosis carotid artery bifurcation models to compare the hemodynamics and biomechanics using FSI method under realistic boundary conditions[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2025: 1-28.
- [5] Aditya B, Aditya S, Abhay R M, et al. Pathogenesis of atherosclerosis and its influence on local hemodynamics: A comparative FSI study in healthy and mildly stenosed carotid arteries[J]. International Journal of Engineering Science, 2021, 167.
- [6] Harry J C, Mergen H G, Anthony C Z, et al. On the nonlinear relationship between wall shear stress topology and multi-directionality in coronary atherosclerosis[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2023, 231: 107418.

- [7] Lu Y, Wu PS, Liu MB, et al. A GPU-accelerated 3D ISPH-TLSPH framework for patient-specific simulations of cardiovascular fluid-structure interactions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024,428.
- [8] Chong MY, Gu B, Armour C H, et al. An integrated fluid-structure interaction and thrombosis model for type B aortic dissection[J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2022, 21(1):261-275.
- [9] Guivier-curien C, Deplano V. A Fluid-Structure Interaction Computational Study of Residual Aortic Dissection to Investigate the Influence of Mechanical Behaviour of Wall and Flap on Flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2025,41(12).
- [10] Qiao YH, Zeng YJ, Ding YF, et al. Numerical simulation of two-phase non-Newtonian blood flow with fluid-structure interaction in aortic dissection[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2019,22(6):620-630.
- 作者简介: 贺苏钰(2002-), 女, 本科, 研究方向: 法医临床与法医病理学。
- 通讯作者简介: 鲁敏翔(1971-), 男, 硕士, 副主任技师, 研究方向: 临床检验学与法医学。