

基于孔隙尺度建模的多孔介质中Carreau流体宏观尺度流动模拟

能动2102班：欧驿闻 指导教师：苏晓辉 论文类型：毕业论文

摘要：多孔介质中非牛顿流体的流动广泛应用于石油开采、化工反应器和生物流体运输等领域，其流变特性与多孔结构的复杂性共同影响流动与传输规律。Carreau模型作为典型的剪切变稀非牛顿模型，能有效描述流体黏度随剪切速率变化的特性，但在宏观建模时面临黏度分布和剪切速率难以确定的问题。本论文基于 COMSOL Multiphysics 构建 Carreau 流体在规则多孔结构中的三维流动模型，分析局部速度场、剪切速率与黏度的空间分布，并构建表观剪切速率的升尺度模型。通过拟合校正因子，建立流速与表观黏度之间的等效关系，并将其引入宏观模型中，利用自定义黏度函数在 COMSOL 中实现对非牛顿行为的有效模拟。

结果显示，该方法可准确反映孔隙结构对流动的影响，兼顾模拟精度与计算效率，为复杂流体在非均匀孔隙结构中的建模提供了一种通用数值策略，也为进一步研究奠定了基础。

关键词：多孔介质；非牛顿流体流动；升尺度

1 研究背景

随着能源、环境和生物工程的发展，非牛顿流体在多孔介质中的输运受到广泛关注，其广泛应用于石油开采、化工反应器、聚合物驱和组织工程等领域。由于其黏度随剪切速率变化，非牛顿流体在复杂孔隙结构中表现出显著的非线性和非均匀性，其流变特性与孔隙结构密切耦合，直接影响传热、传质与系统稳定性。Carreau 模型因能有效描述剪切变稀特性，在多糖、聚合物和生物流体建模中被广泛采用。然而，在宏观尺度下直接建模存在困难，如剪切速率难以定义、黏度分布非均匀，传统方法难以准确反映微观流变与结构之间的耦合关系，影响模拟精度。近年来，升尺度建模方法逐渐成为主流。该方法通过孔隙尺度数值模拟提取微观剪切速率和黏度分布，构建宏观表观物性模型，为非牛顿流动的精确建模提供理论与数据支持。COMSOL Multiphysics 作为强大的多物理场建模工具，为实现孔隙尺度至宏观尺度的建模提供了理想平台。

2 发展现状

国内研究多聚焦于聚合物流驱、多孔传热及生物流动等工程场景，基于 COMSOL、CFD 等平台建立多尺度建模体系，并通过实验验证提升模型实用性。部分研究也探索了图像识别与机器学习在升尺度过程中的应用，为复杂结构下的模型泛化和参数预测提供新路径。在国外，剪切稀化型非牛顿流体（以 Carreau 模型为代

表) 在多孔介质中的升尺度建模研究起步较早, 已形成从解析理论到数据驱动模型的完整发展路径。国际研究机构通过数值仿真(如孔隙网络建模、体积平均法、LBM等)实现结构因子的提取。总体而言, 非牛顿升尺度建模取得了显著进展, 但仍面临如结构通用性差、剪切速率定义不统一、多物理耦合不足、实验验证薄弱等问题。

3 数值计算方法

3.1 物理模型及边界条件设置

其几何构型为一个具有代表性拓扑的“孔隙单元(Representative Elementary Volume, REV)”, 适用于升尺度建模、黏度函数回代以及渗透率参数提取等多尺度研究任务。整个几何域为一块长方体计算区域, 尺寸为:

$$L_x=0.2\text{cm}, L_y=0.2\text{cm}, L_z=0.6\text{cm}$$

其中, x - y 方向为横向, z -方向为主流动方向, 流体由底部注入、顶部流出。由于仅需要孔隙空间的区域即可进行建模, 因此不需要明确解析多孔基体。如图3-1所示。

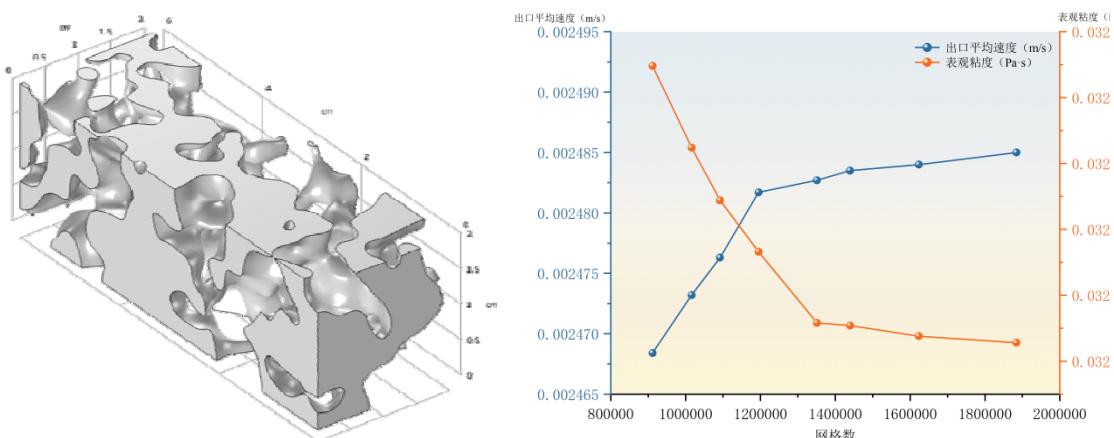


图3-1流体域

图3-2: 网格无关性验证

考虑流体在孔隙结构中流速极低、惯性影响可忽略, 采用稳态不可压缩 Stokes 流模型描述其行为, 该模型被广泛用于聚合物溶液、血液流动等低雷诺数稀化体系模拟。参数设置参考实际高分子流体系统并取已有实验结果: $\mu_0=0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty=0.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda=1.5 \text{ s}$, $n=0.65$ 。该参数集对应于典型剪切稀化型聚合物流体, 允许系统自动适应局部结构剪切场, 避免人为划定高低黏度区域。

3.2 网格划分和独立性验证

以出口平均速度 u_{out} 及表观黏度 μ_{app} 为目标物理量, 分别构建八组不同分辨率的网格系统, 通过探针(Integral Probe)在出口面提取稳态响应数据, 评估关键变量的收敛趋势。通过划分八组不同密度的自由四面体网格(Mesh1–Mesh8), 分析网格数量变化对两项目标物理量的影响。对应网格数量依次为: 911,880; 1,016,188;

1,092,060; 1,195,076; 1,351,164; 1,439,632; 1,623,212 及 1,884,148。随着网格数量提升，如图3-2所示出口平均速度稳定于 $0.00247 \sim 0.00249 \text{ m/s}$ ，变化极小；而表观黏度则从 $0.03222 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 逐步下降至 $0.03201 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，整体下降幅度不足 0.7%。从 5 组（网格数 1,439,632）起，与的变化已趋于收敛，后续网格密度增加对模拟结果影响不再显著，二者的相对误差均控制在 0.1% 以内。

本文选择 Mesh5 网格方案作为三维求解的最优平衡配置，不仅保证模拟结果满足网格无关性要求，也有效控制了计算成本，为后续宏观建模奠定可靠基础。

4 计算结果分析

4.1 升尺度建模与参数提取

为获取 Carreau 型非牛顿流体的表观黏度—剪切率响应曲线，设计了对入口压强 P_{in} 的参数扫描，设置如下四组等比对数间隔的输入： $P_{in}=3.1623\text{pa}$, $P_{in}=10\text{pa}$, $P_{in}=31.623\text{pa}$, $P_{in}=100\text{pa}$ ，输出变量： u_{out} : 出口质量流速换算平均速度； $dPdL$: 平均压降； $\mu_{app} = \kappa_0 / u_{out} * dPdL$ 。为建立一个可泛化至宏观尺度的表观剪切速率表达式，需引入结构修正系数 α ，并通过最小二乘法拟合精确数值。如图4-1实际拟合结果 $R^2 \approx 0.998$ ，说明模型解释能力强。

4.2 升尺度模型的宏观一致性与结构通用性

本小图4-1显示表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{app}$ 与归一化速度 $\dot{\gamma}_{app} = \alpha \frac{|u|}{\sqrt{\kappa \epsilon_p}}$ 呈线性关系，宏观模型曲线与微观拟合曲线几乎重合，验证了升尺度表达式在结构不同、压强变化情况下的稳定性；图4-2，表观黏度 μ_{app} 随归一化速度单调下降，两模型数值差距始终控制在 5% 以内，说明黏度退化行为已通过升尺度有效传递。

以上结果表明，这种一致性说明了升尺度表达式成功捕捉了结构主导剪切形成机制中的两个核心变量：平均速度幅度与局部几何尺度对剪切率的放大效应。其本质是通过结构因子 α 对微观剪切层发展速度的归一化响应建模。

值得强调的是，该升尺度黏度-速度函数的稳定性，使得宏观模型无需再进行逐结构细化的孔隙重建，仅需结构统计参数 (κ 、 ϵ_p) 与拟合常数 α 即可构建等效预测框架。该方法理论上适用于更多复杂流变模型（如 Cross、Power-law 等）以及耦合传热、多相扩展场景，未来可结合数据驱动方法进一步拓展升尺度函数表达形式，实现从结构图像到黏度场的快速预测。

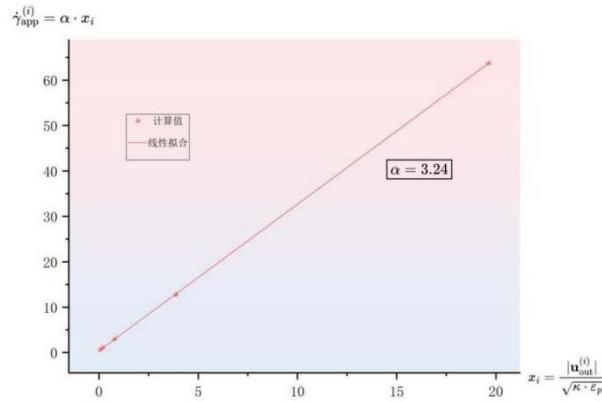
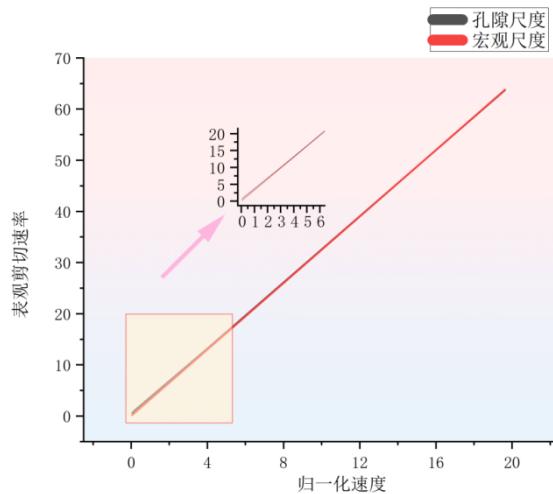
图4-1：最小二乘法拟合 α 

图4-2：表观剪切速率与归一化速度的关系曲线（微观模型与宏观预测对比）

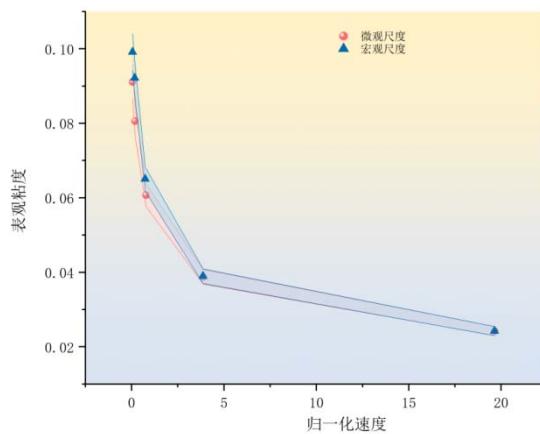


图4-3：表观黏度随归一化速度的变化趋势（微观提取与升尺度模型对比）

5 研究结论与未来展望

本文针对非牛顿Carreau流体在多孔介质中的流动问题，建立了从微观孔隙尺度到宏观工程尺度的升尺度建模框架。通过孔隙尺度模拟揭示了剪切稀化效应的空间

分布规律，提出了基于表观黏度和结构修正系数 α 的升尺度方法，验证了其在Brinkman扩展模型中的准确性（误差 $<5\%$ ）。然而，当前研究在实验验证、 α 的普适性表达及多场耦合等方面仍存在不足。未来需结合实验标定、结构拓扑优化及机器学习等方法，进一步发展适用于复杂工况的高效预测模型，推动该技术在能源、生物医学等领域的工程应用。