

复合材料纤维微观尺度建模及渗透率预报研究

李晨, 陈程, 高丽敏

中国商飞北京民用飞机技术研究中心民用飞机结构与复合材料北京市重点实验室, 北京, 102211

简介:本文提出了一种复合材料纤维排列的随机结构建模方法。该方法使得对纤维束中纤维单丝层面的随机排列结构对渗透性和流动特性的影响等研究成为可能。本文考虑了四个参数, 包括三个微观结构参数: 纤维束中域的边长L、纤维单丝半径值波动范围 Δr 、纤维单丝间最小间距 δ_{min} 和一个宏观参数: 孔隙率 ϵ 。对纤维随机排列的多孔介质横向饱和流动进行了有限元分析, 并采用Morris全局灵敏度分析(GSA)方法, 研究了四个参数对渗透率的影响。结果表明宏观参数气孔率 ϵ 对纤维增强材料的渗透性能影响最大。

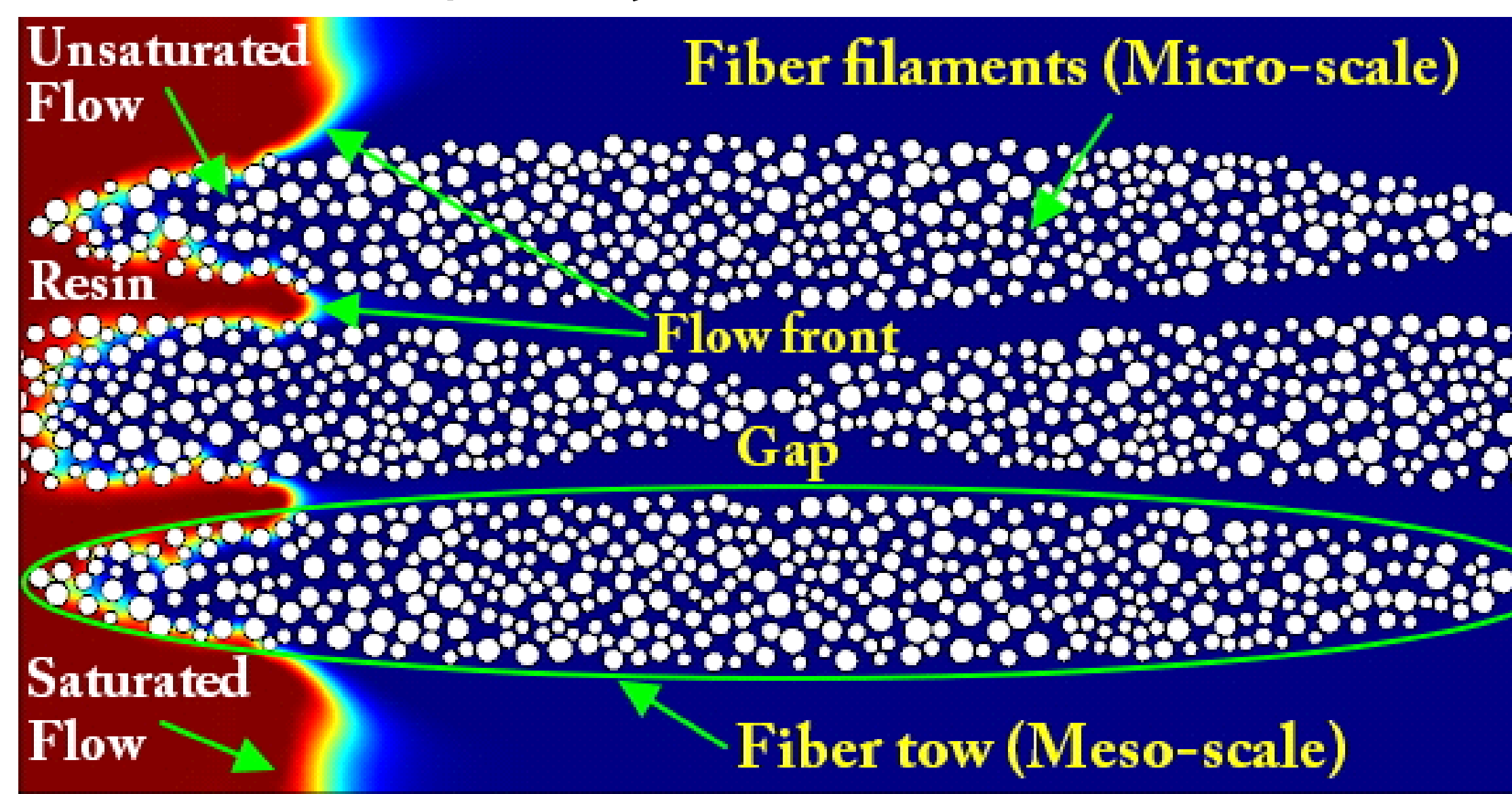


图 1. 介观束内束外二维树脂流动

计算方法:本研究采用CFD模块和Livelink™ for MATLAB®。经计算验证雷诺数 $Re \ll 1$, 属于层流范畴, 因此速度域控制方程为:

Navier-stokes 方程与连续性方程联立:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0$$

Darcy定理变换获得渗透率计算方程:

$$U = -\frac{K}{\mu} \nabla p \implies u_t = -\frac{K_t}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} = \epsilon \cdot U \implies K_t = \frac{\mu \epsilon}{P_{in} - P_{out}} \int_{\Gamma_s} \vec{v} \cdot \vec{n} d\Gamma$$

几何模型建立:基于Monte Carlo方法采用MATALB编写几何随机建模程序, 并通过Livelink™ for MATLAB®连接导入COMSOL Multiphysics软件。

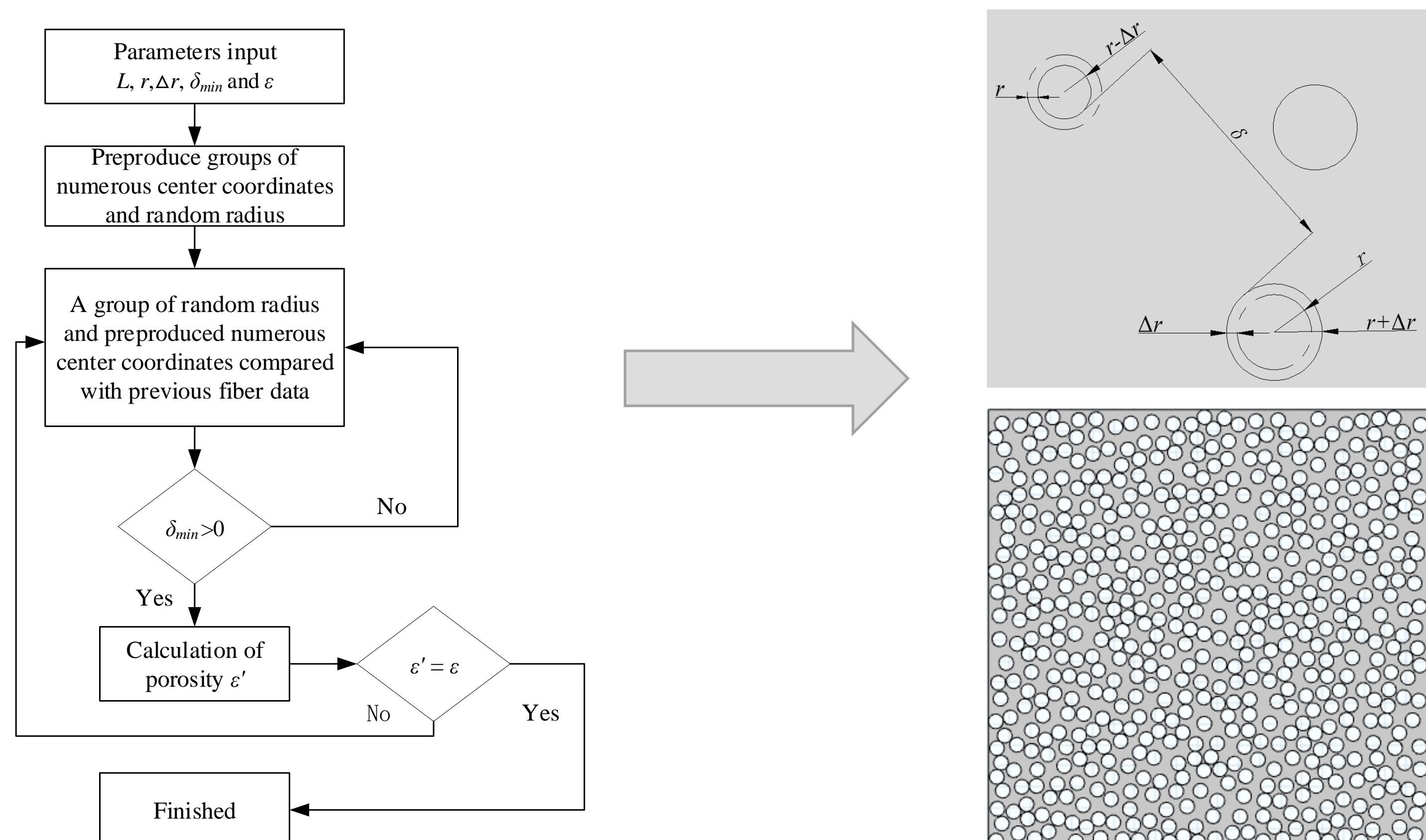


图 2. Monte Carlo随机程序建模流程和实现

边界条件和初始值:

| 变量 | 数值 | 单位 |
|----------|------|-------------------|
| 密度 | 1000 | Kg/m ³ |
| 动力粘度 | 0.1 | Pa.s |
| Pin入口压强 | 1 | bar |
| Pout出口压强 | 1 | bar |

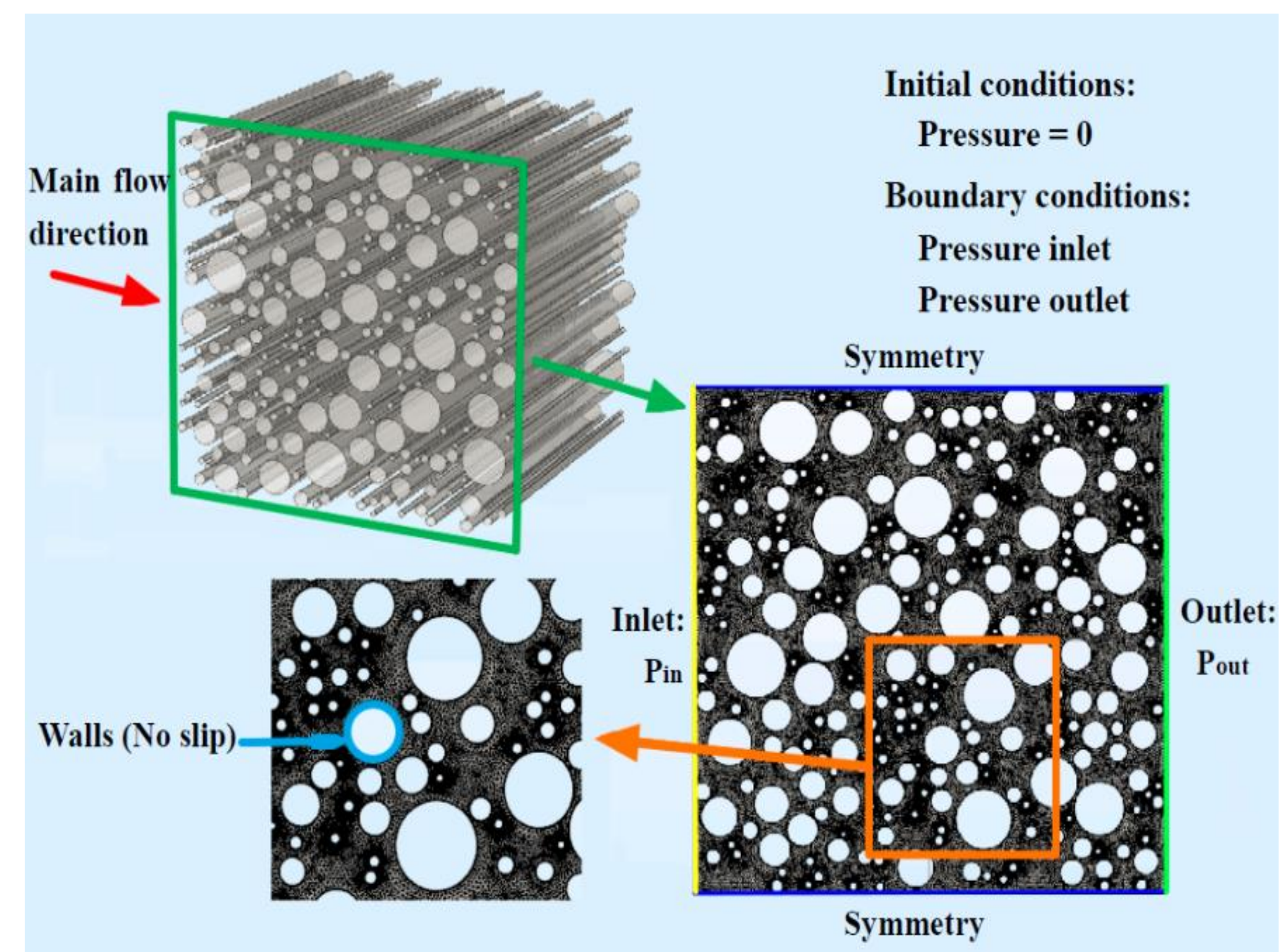


图 3. 初始值和边界条件

结果:速度场分布及渗透率。

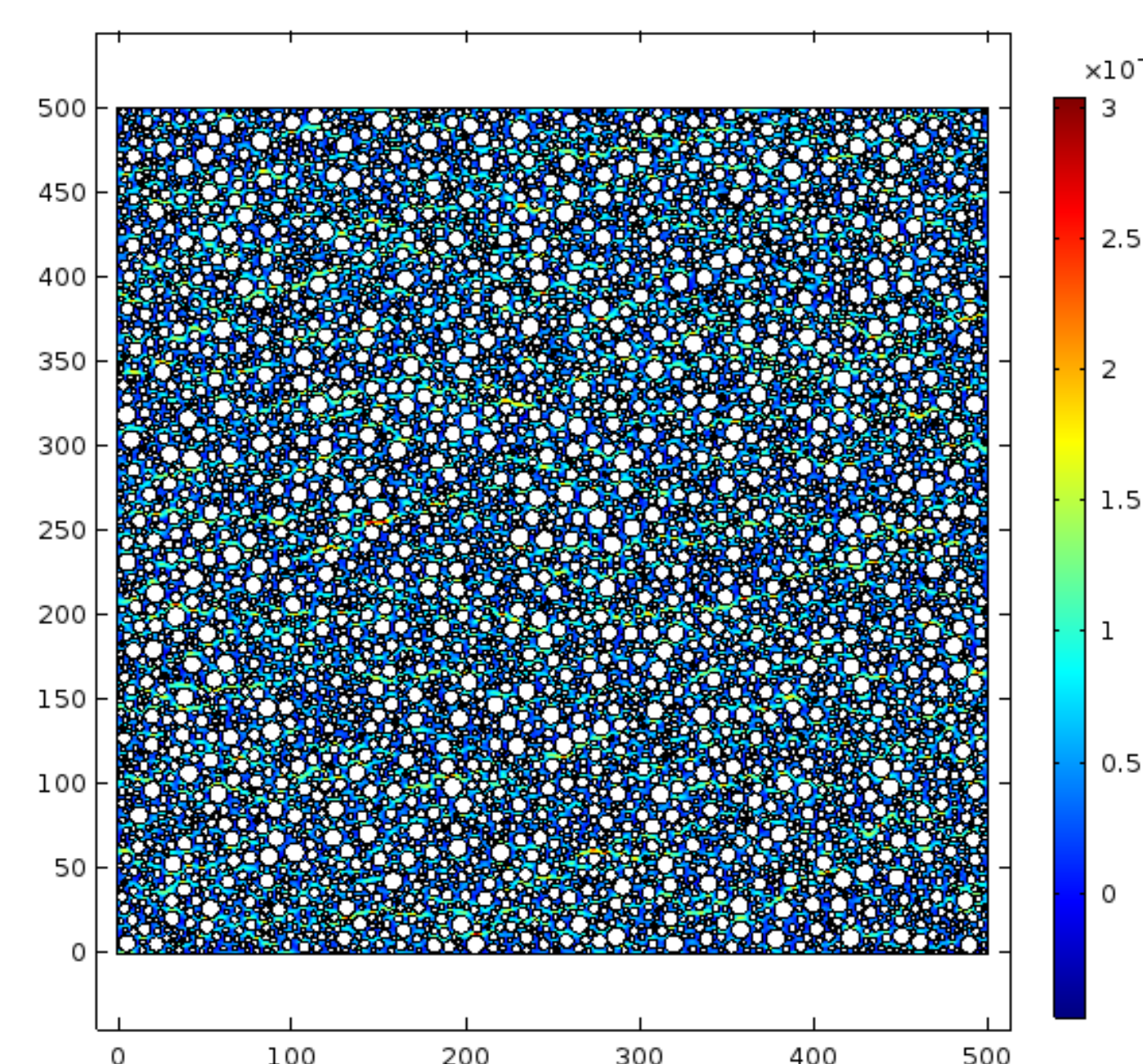


图 4. 速度场分布

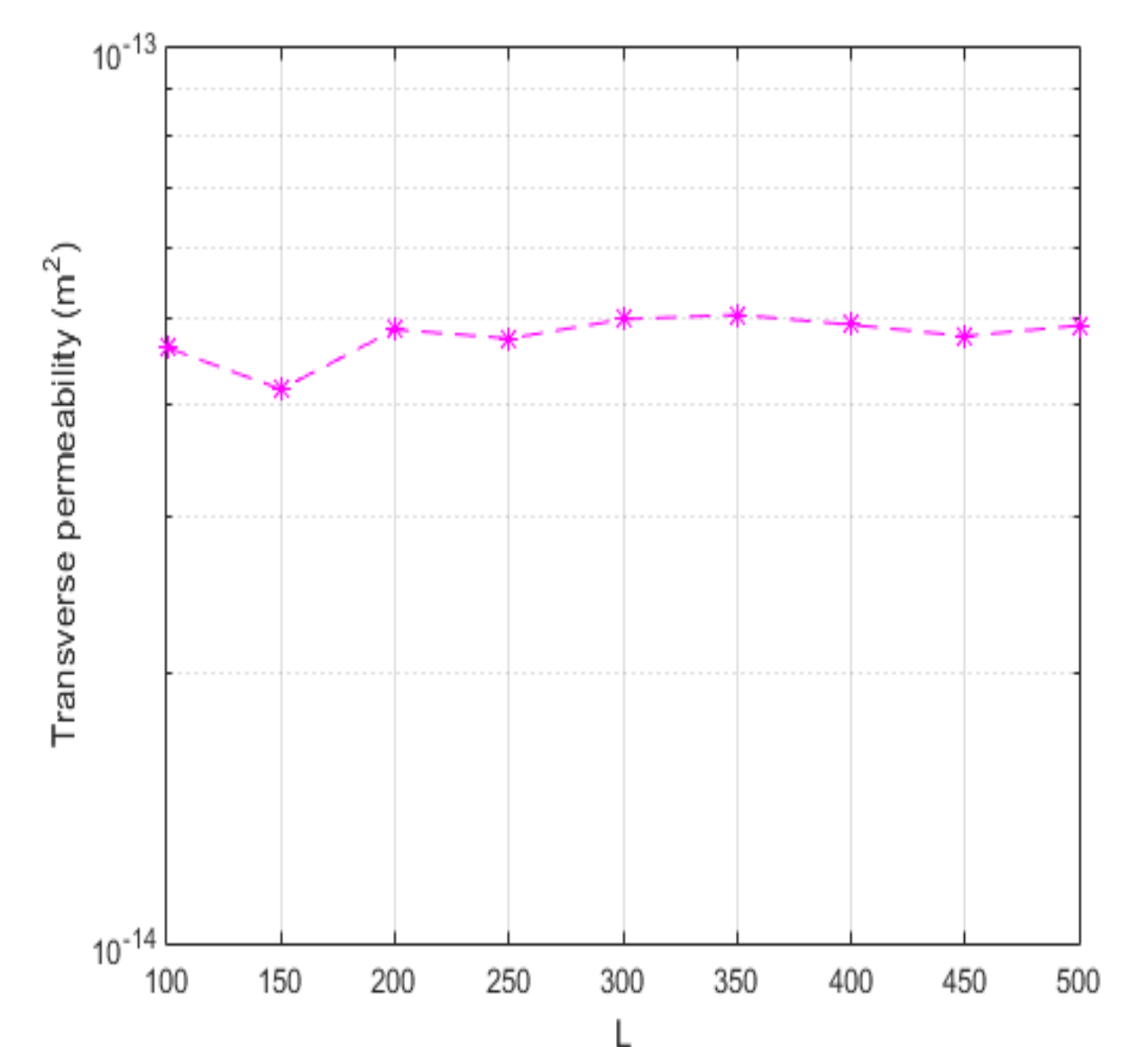


图 5. L对渗透率影响

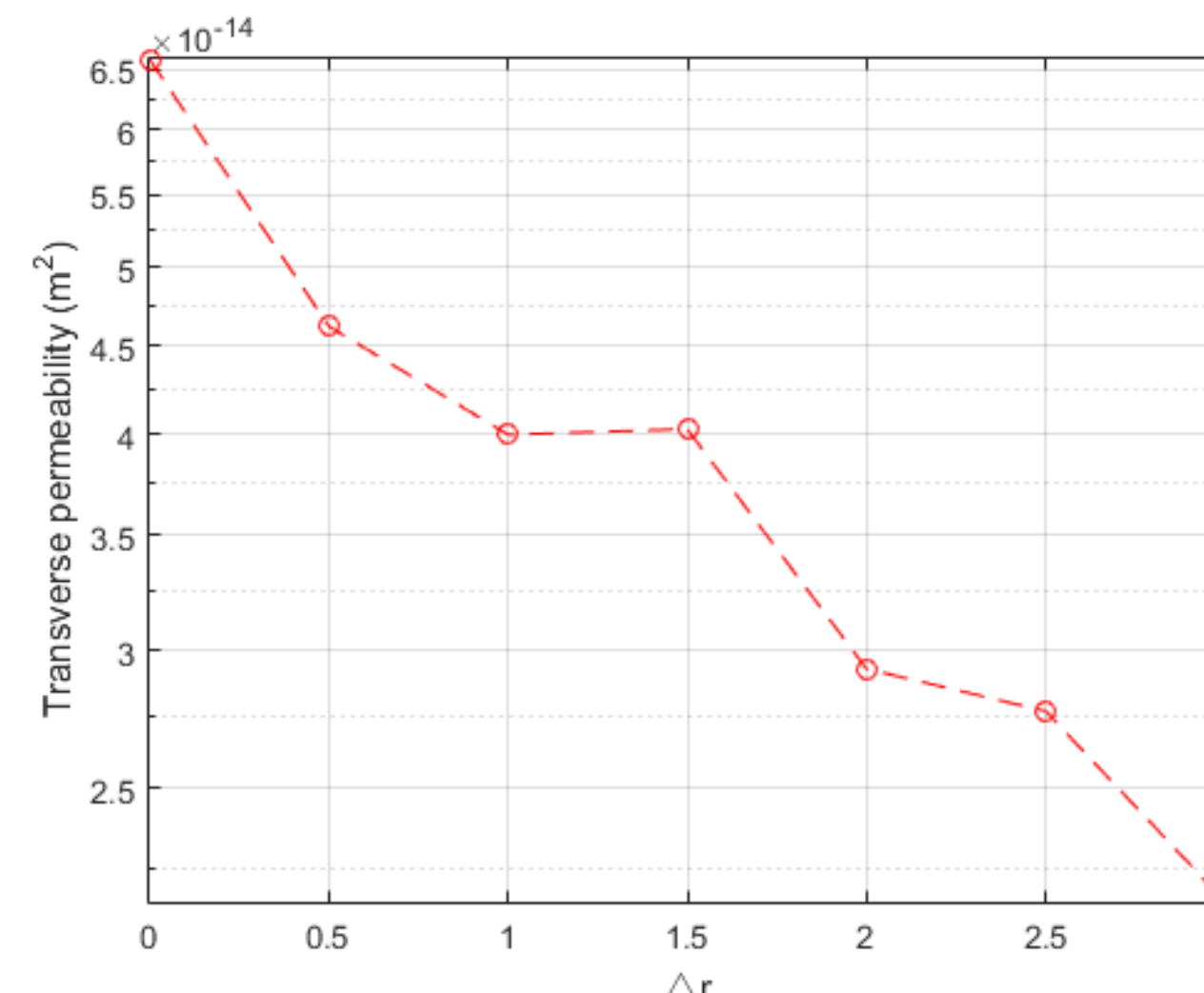


图 6. Δr对渗透率影响

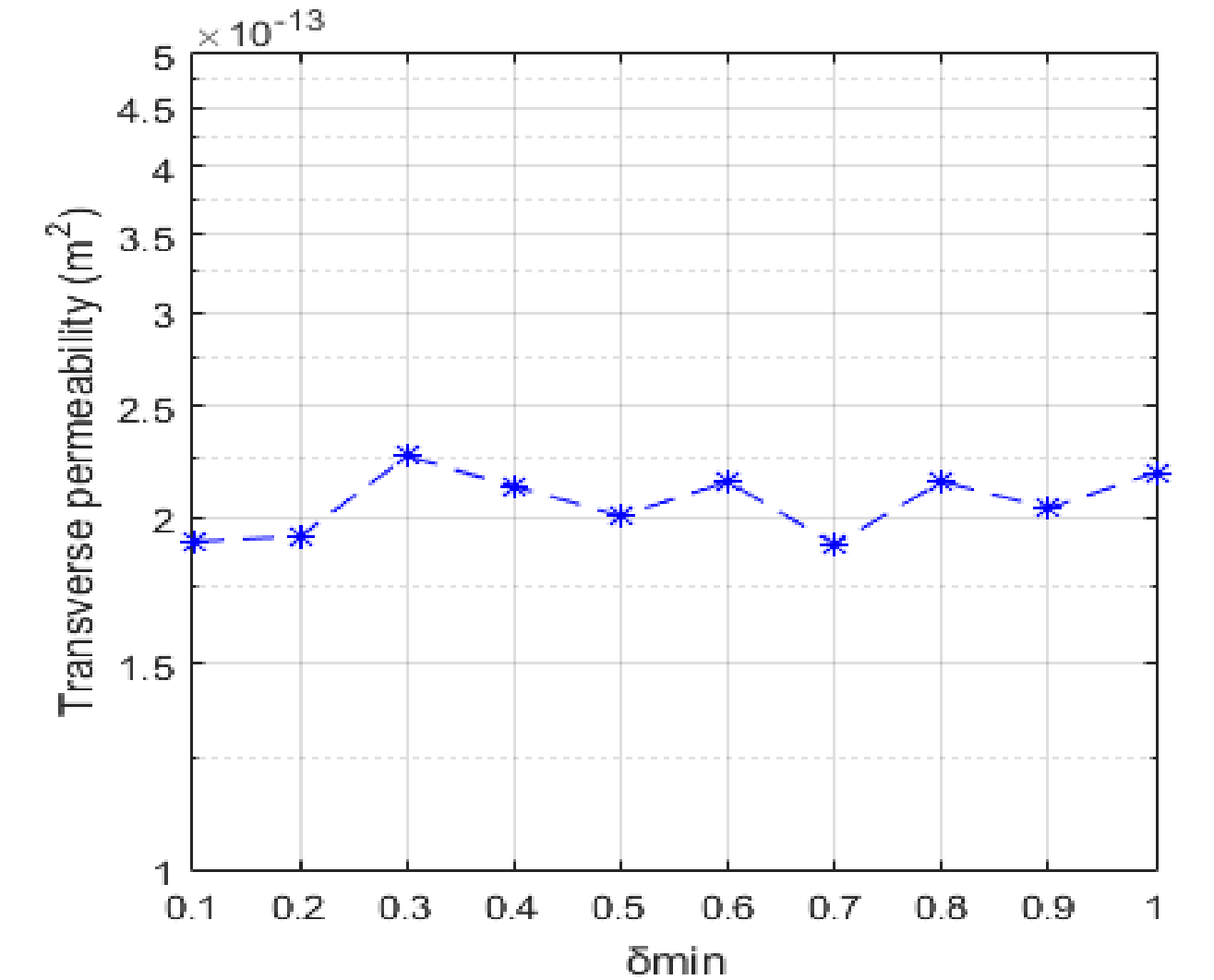


图 7. δ_min对渗透率影响

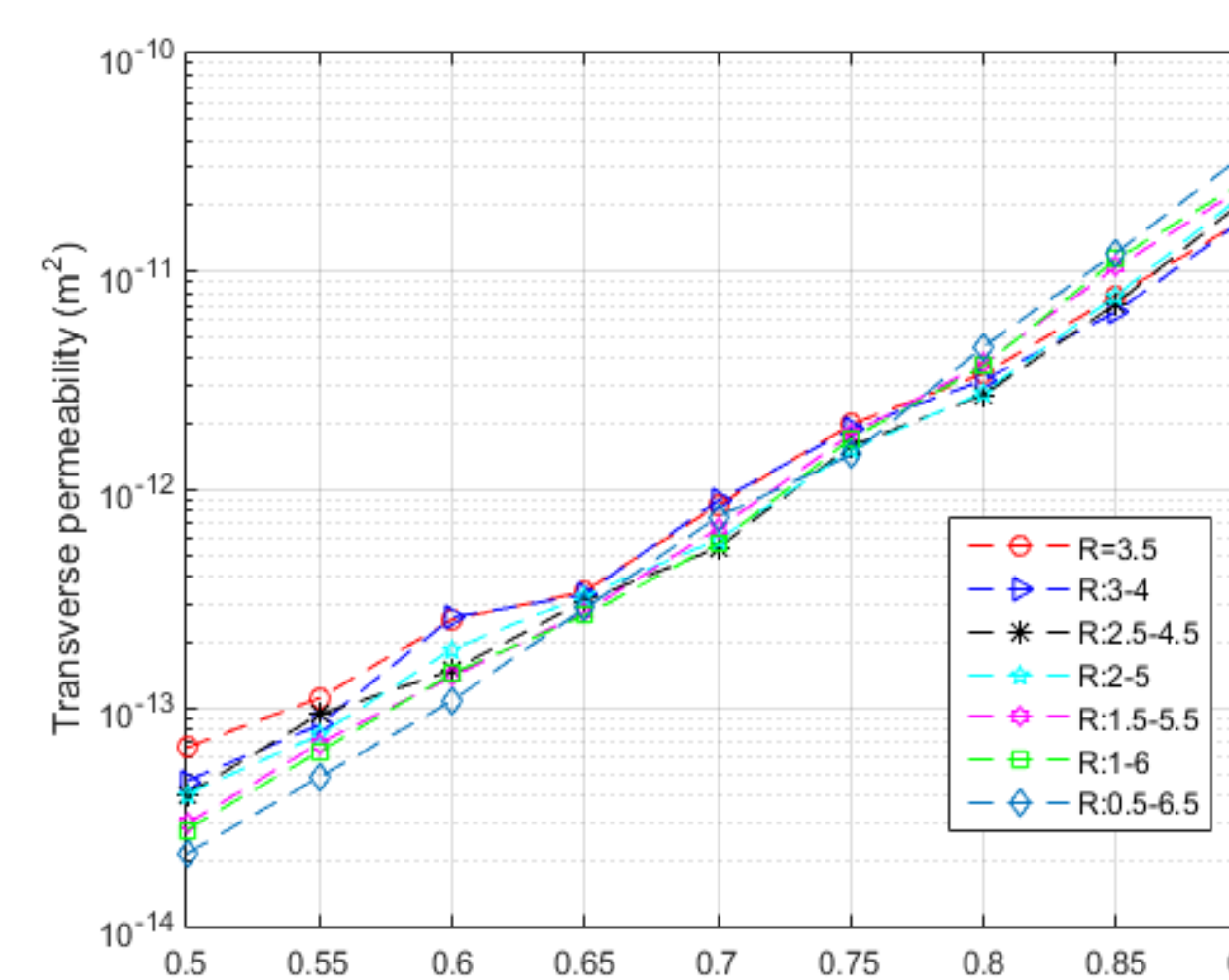


图 8. ε对渗透率影响

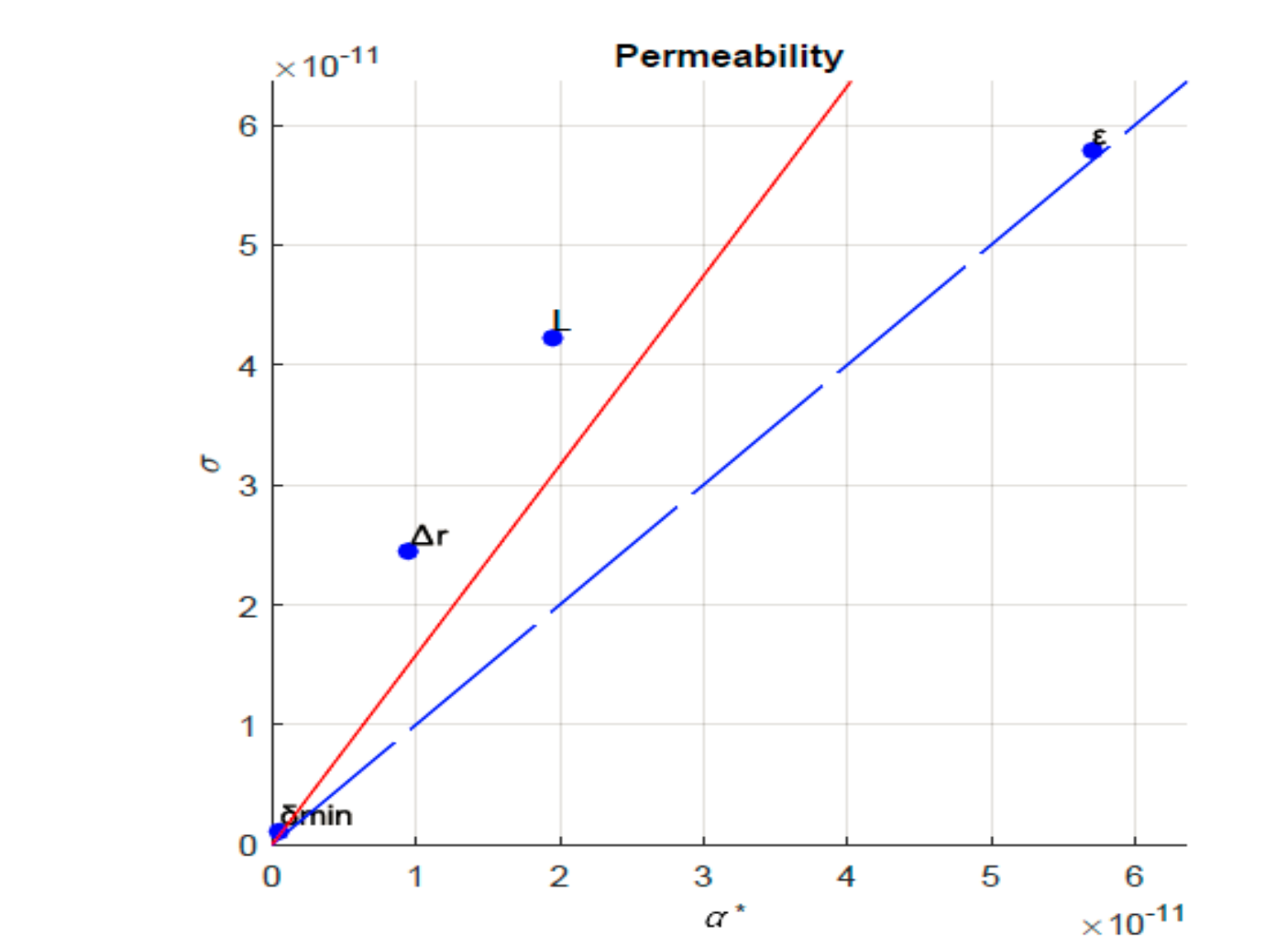
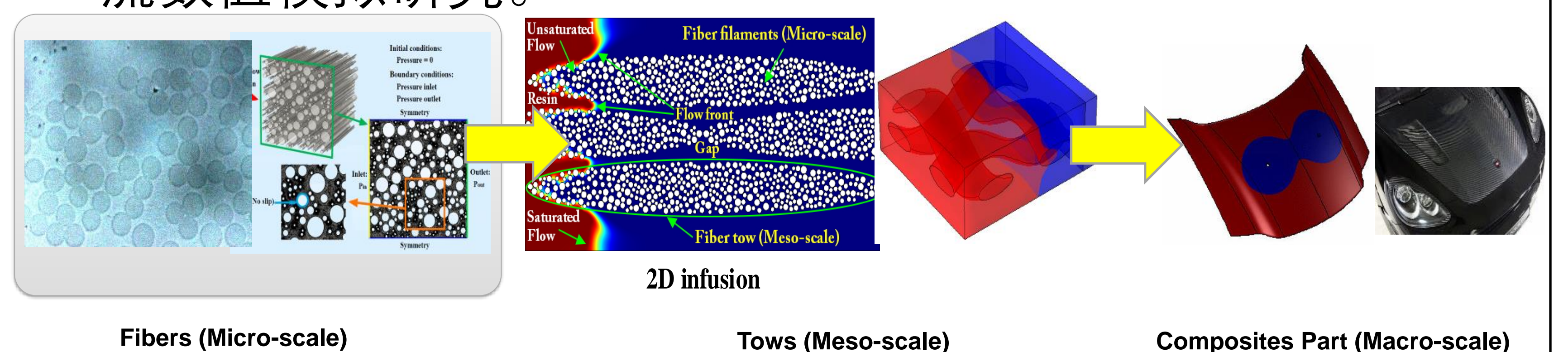


图 9. Morris灵敏度分析

结论:通过Morris灵敏度方法, 评价了L、 Δr 、 δ_{min} 和 ϵ 四个参数对纤维渗透率的影响, 结果表明 ϵ 对渗透率有更显著的影响。本研究对介观和宏观尺度研究有积极意义。
已开展研究和未来展望:复合材料液体成型工艺多尺度渗透流数值模拟研究。



参考文献:

Li, Chen, Cantarel, Arthur, Gong, Xiaojing, Influence of structural parameters at microscale on the fiber reinforcement, Journal of Composite Materials. (2018)