

引言: 动脉瘤破裂是引起蛛网膜下腔出血的一种主要诱因。蛛网膜下腔出血轻微临床症状多表现为头痛、恶心, 严重的出现脑中风、偏袒甚至猝死。本文使用 COMSOL Multiphysics® 软件对一系列动脉瘤模型进行模拟计算和分析, 以期获得不同几何特性对动脉瘤速度、压力、壁面切应力 (WSS) 等参数的影响。

结果: 通过模拟, 再现了一个脉动周期内, 动脉瘤内流场发展情况。通过模拟发现动脉瘤内血液流动形式基本与图1所示相类似, 血液流入动脉瘤颈时对图3所示 C、D 区域冲击较大, 然后在动脉瘤内部形成一次旋流, 其中大部分又重新注入载瘤血管主流中。

通过模拟发现, 不同的几何形状对动脉瘤内流场的分布有一定的影响, 这也是判断动脉瘤具有破裂危险严重与否的一个主要参考因素。

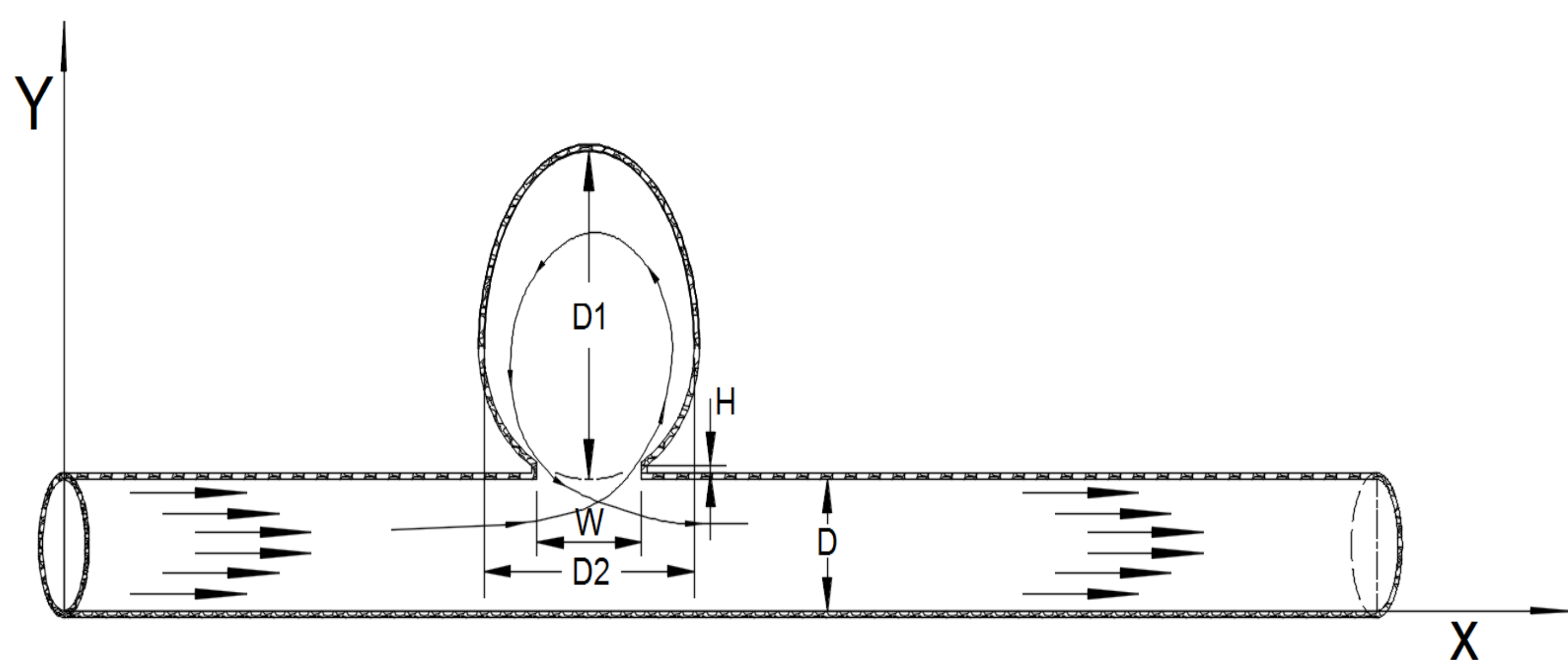


图 1. MAC动脉瘤模型示意图

模拟设置: 采用 COMSOL Multiphysics® 软件对动脉瘤的理论模型进行了建模, 如图1所示, 左侧为速度入口, 采用脉动速度的边界条件 (如图2), 右侧为压力出口。假设血液为不可压缩、恒定粘度流体, 运用 Navier-Stokes 方程对内部的流动进行了仿真模拟。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

脉动速度及流体属性设置如图2及表1所示。

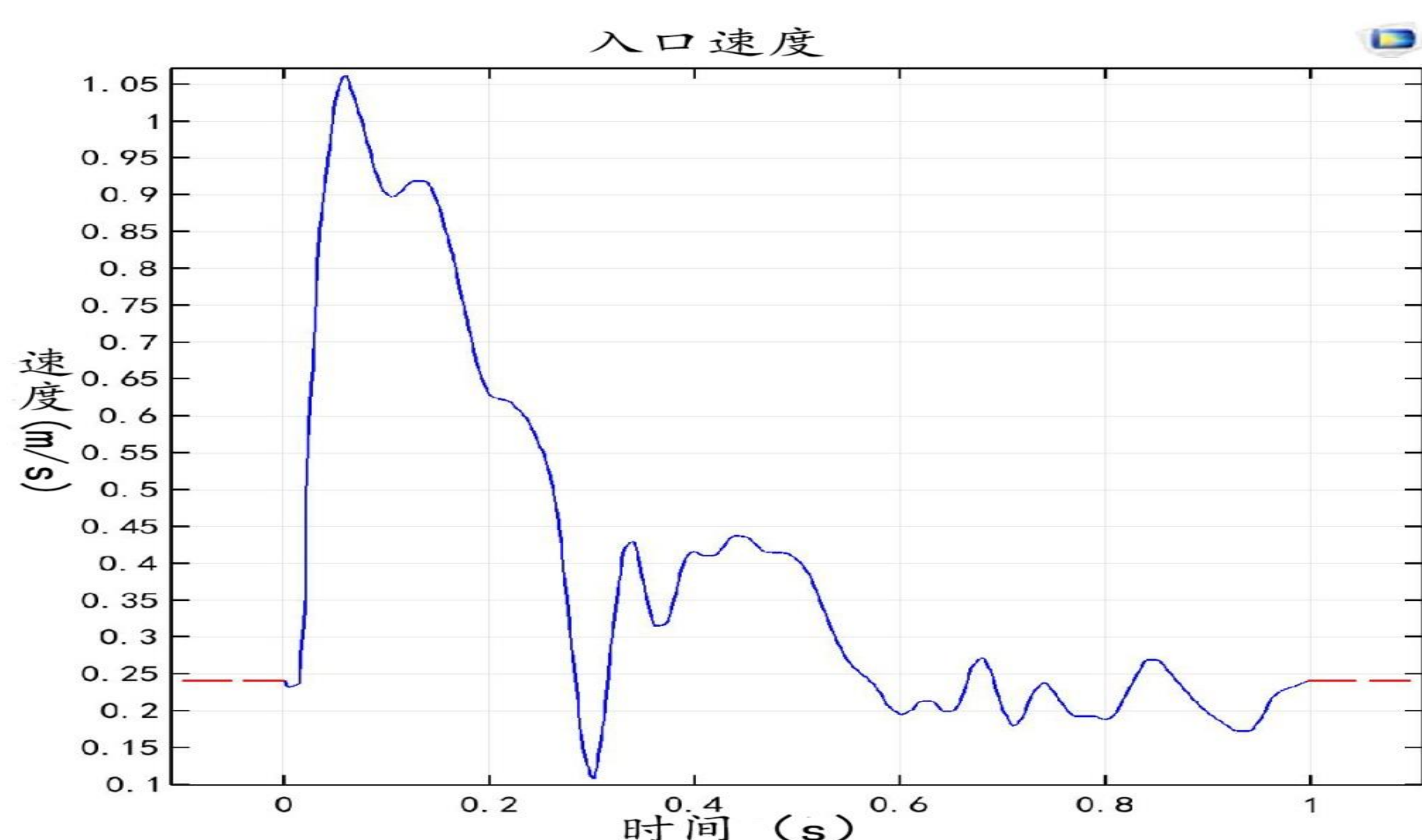


图 2. 脉动速度

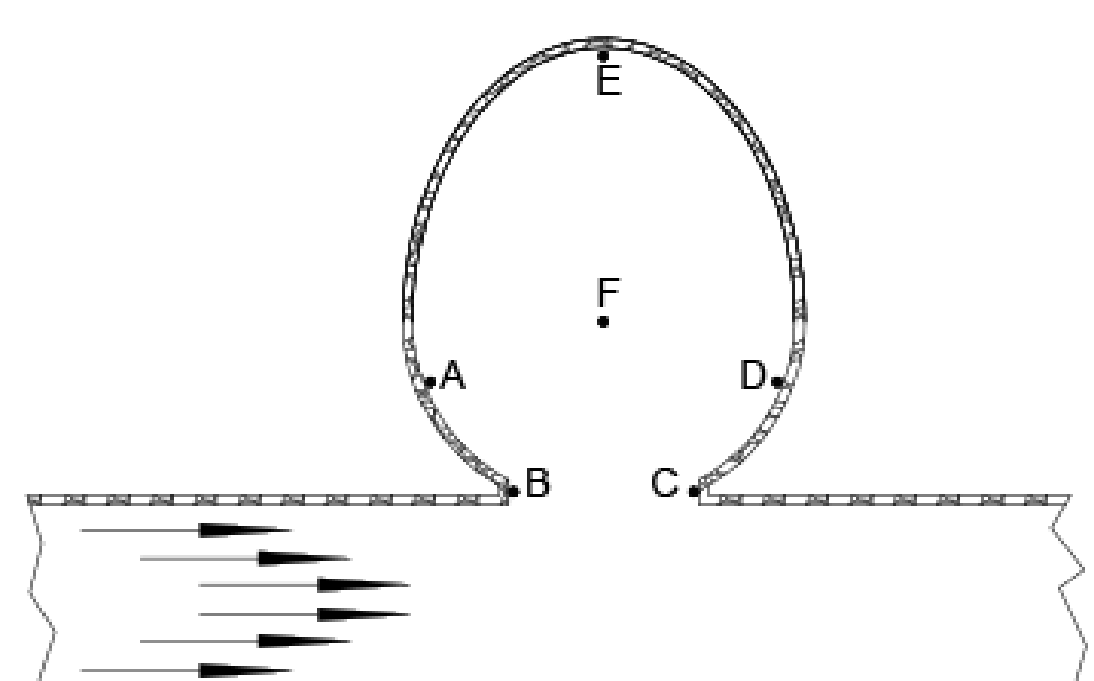


图 3. 数据采集示意

变量	值	单位
密度	1060	Kg/m ³
动力粘度	0.005	Pa*s

表 1. 血液特性参数

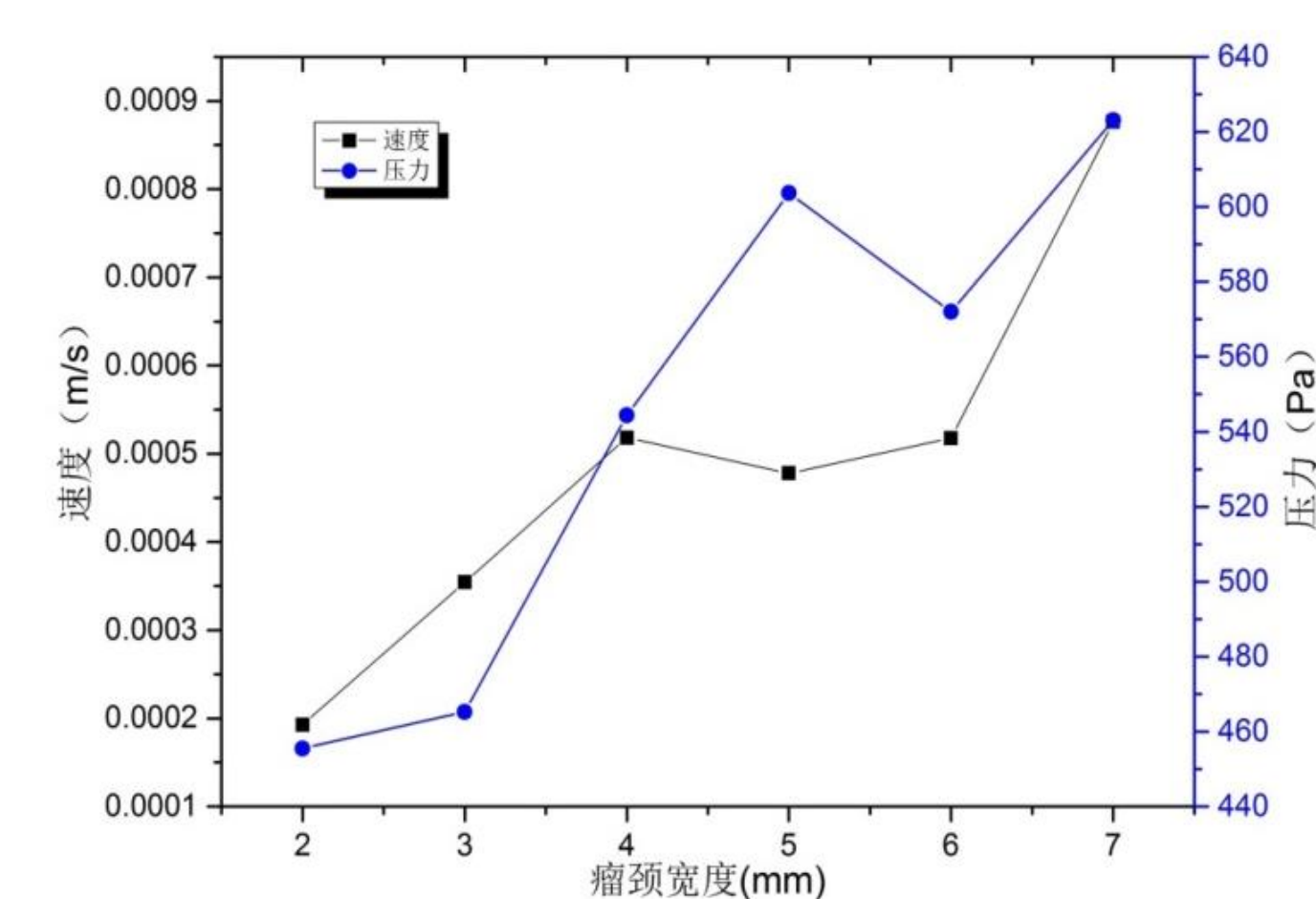


图 4. E 点速度与压力分布

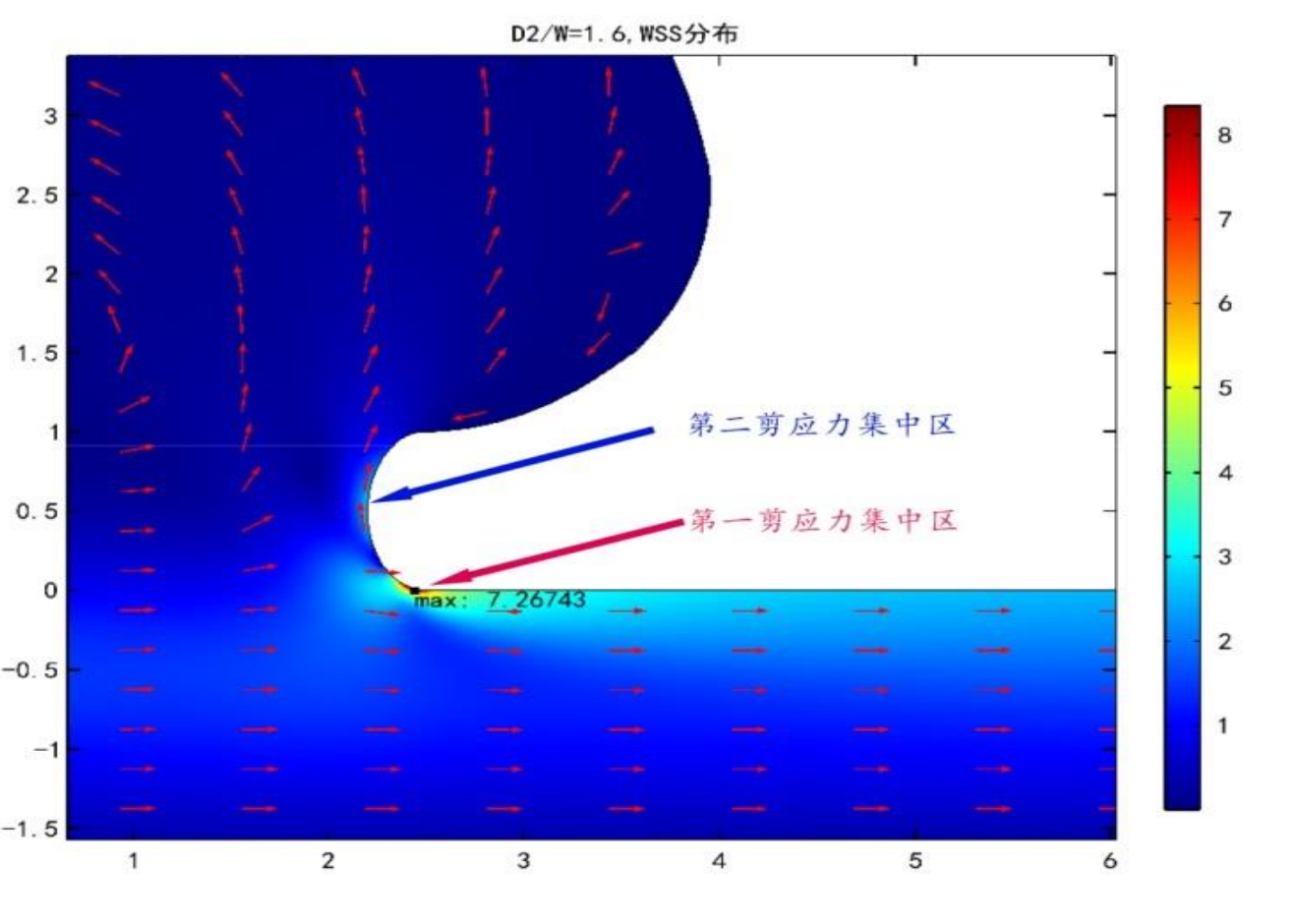


图 5. WSS 分布云图

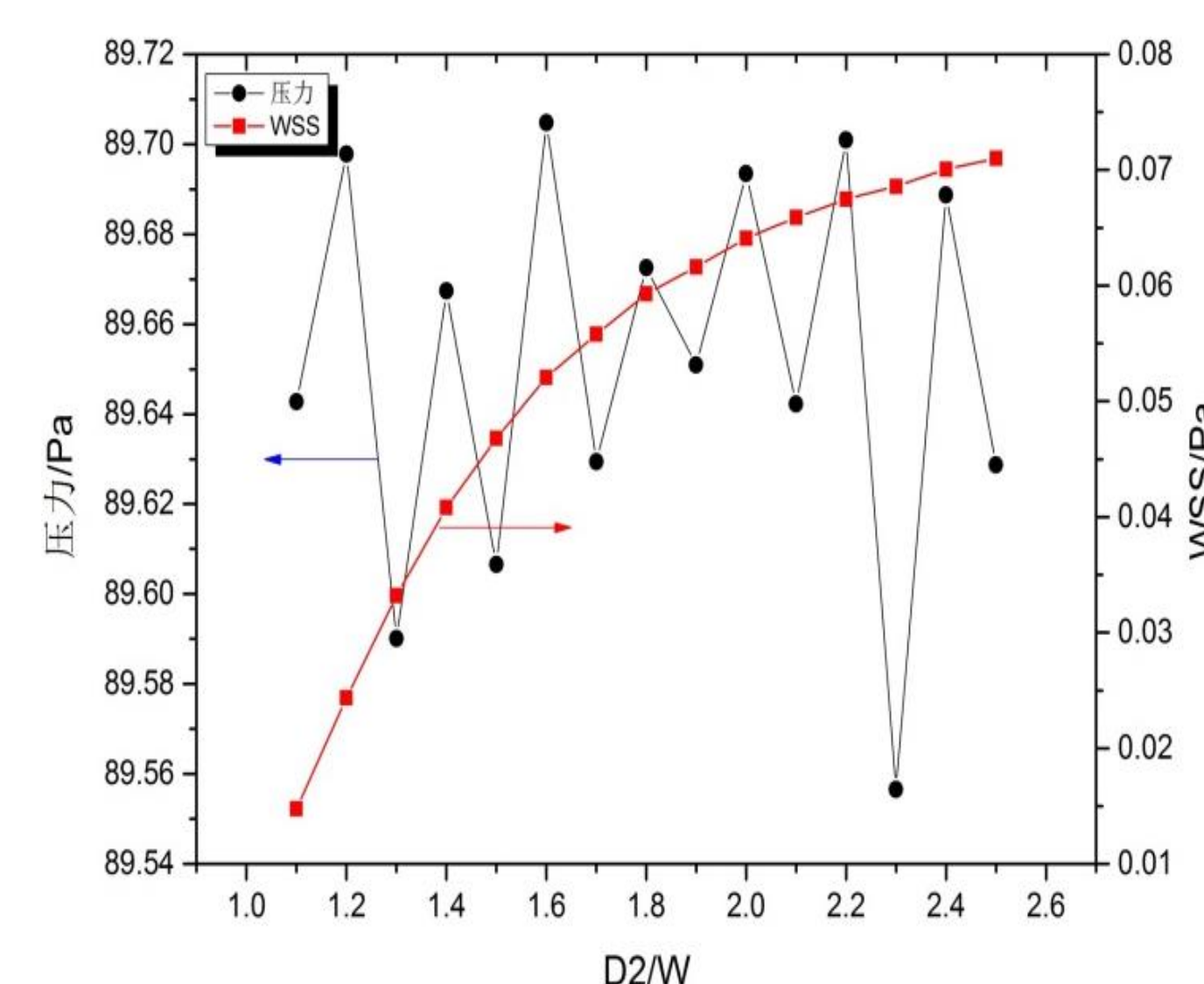


图 6. D2/W 对 E 点速度与压力影响

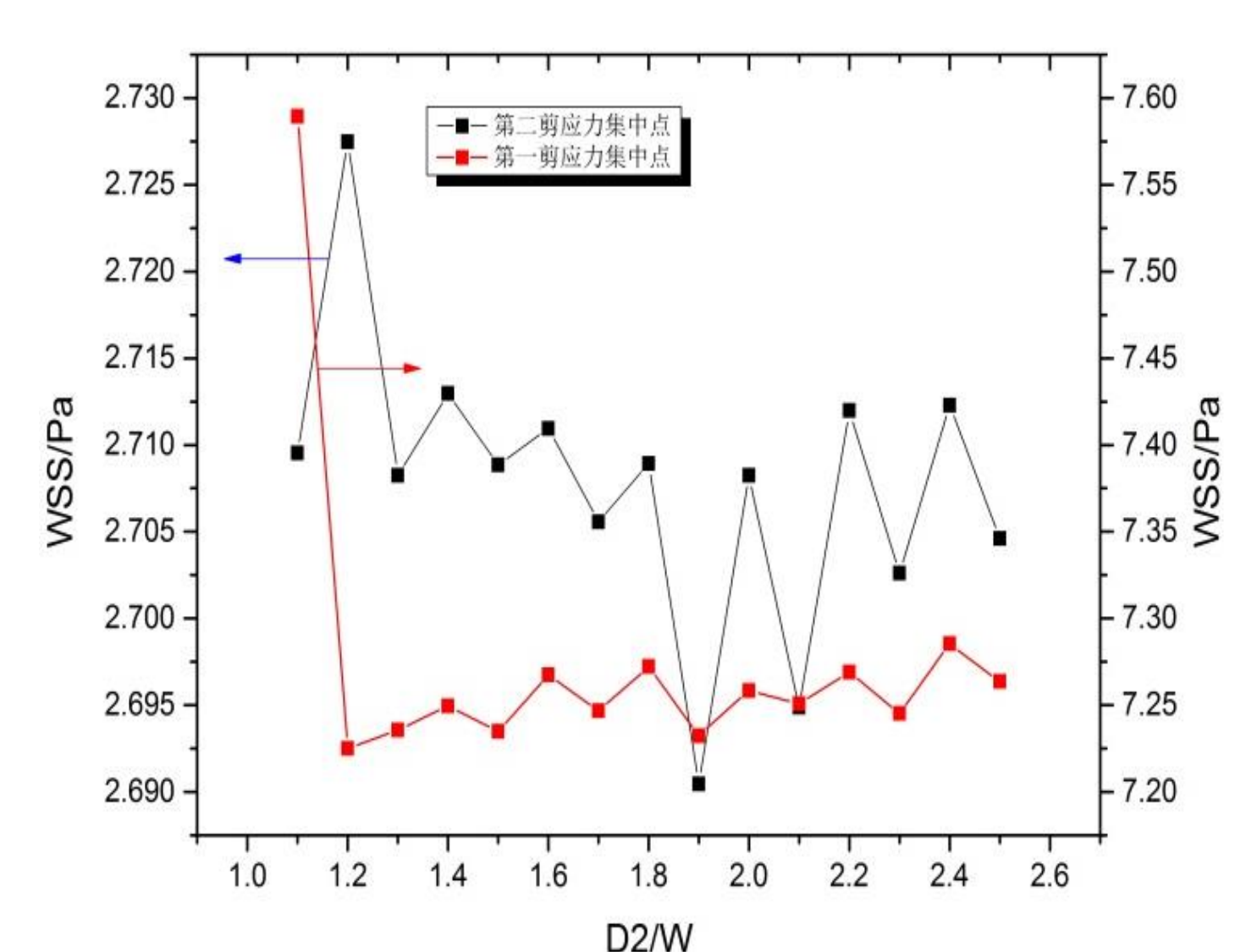


图 7. D2/W 对 WSS 影响

结论: 相比窄颈, 宽颈动脉瘤内旋流更强, 中心区流速更低, 中心区更易形成血栓; 顶点处压力更大, 更易破裂。增大 D2 与 W 的比值, 顶点处 WSS 呈非线性增长, 但最大值低于安全剪应力区间的下限, 破裂危险性依然很高。接下来的工作, 我们将对流固耦合状态下的动脉瘤做进一步的研究。

参考文献:

- 徐瑾瑜, 破裂与未破裂镜像后交通动脉瘤形态与血流动力学分析[J], 临床研究, 18卷, 385-388 (2013)
- 张建忠, 血流动力学诱导炎性反应对颅内动脉瘤形成机制的研究进展[J]. 中国脑血管病杂志. 381-384. (2014)
- Chander Sadasivan et al. Physical Factors Effecting Cerebral Aneurysm Pathophysiology [J]. annals of biomedical engineering, 41, 1347-1365. (2013)
-