

## ·实验研究 Experimental research·

## 颈内动脉狭窄局部的流固耦合有限元分析

李建伟, 纪盛章, 宋金玉, 郑 珺

**【摘要】 目的** 研究不同狭窄程度颈内动脉的血流动力学特点,探索颈内动脉狭窄局部粥样硬化斑块形成和发展机制。**方法** 基于颈动脉 CTA 图像构建颈内动脉轻、中、重度狭窄模型,并予流固耦合(FSI)有限元分析,检测 1 个心动周期内颈内动脉狭窄近端、喉部和远端的壁面压力(WP)、壁面剪切力(WSS)和血流速度。**结果** 随着狭窄程度增加,WP 在狭窄喉部和狭窄远端明显降低;WSS 在狭窄喉部逐渐增大,在狭窄两端逐渐减小;血流速度在狭窄喉部增加,在狭窄两端减低,且狭窄远端湍流越发明显。**结论** 随着颈内动脉狭窄程度增加,脑供血量逐渐降低,缺血性脑卒中和狭窄处斑块易损概率增大,促进狭窄远端更易形成斑块。基于 FSI 有限元分析,可对不同颈内动脉狭窄局部粥样硬化发生和发展作出客观评价,有助于临床预防和治疗评估。

**【关键词】** 流固耦合; 颈内动脉狭窄; 粥样硬化斑块; 血流动力学

中图分类号:R743.3 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2018)-05-0447-04

**Fluid structure interaction finite element analysis of local internal carotid artery stenosis** LI Jianwei, JI Shengzhang, SONG Jinyu, ZHENG Jun. Department of Radiology, Tianjin Municipal No.4 Central Hospital, Tianjin 300140, China

Corresponding author: JI Shengzhang, E-mail: jsz0549@163.com

**【Abstract】 Objective** To study hemodynamic characteristics of different degrees of internal carotid artery stenosis, to explore the formation mechanism and development mechanism of local atheromatous plaque of internal carotid artery stenosis. **Methods** Based on the carotid CTA imaging data, the mild, moderate and severe stenosis models of internal carotid artery were constructed. Using fluid structure interaction (FSI) finite element analysis, the wall pressure (WP), wall shear force (WSS) and blood flow velocity at the proximal end, laryngeal site and distal end of internal carotid artery stenosis within one cardiac cycle were tested. **Results** With the increasing of stenosis degree, WP values at the laryngeal site and distal end of internal carotid artery stenosis were significantly decreased, while WSS values became gradually increased at the laryngeal site of internal carotid artery stenosis and became gradually decreased at both ends of internal carotid artery stenosis. The blood flow velocity was increased rapidly at the laryngeal site of internal carotid artery stenosis and was decreased at both ends of internal carotid artery stenosis, and the turbulence at the distal end of stenosis became more pronounced. **Conclusion** With the increasing of the degree of internal carotid artery stenosis, the cerebral blood supply is gradually decreased, and the probable occurrence of ischemic stroke and plaque vulnerability become increased, which, in turn, promotes the formation of plaque at the distal end of the stenosis. Based on FSI finite element analysis, the occurrence and development of local atherosclerosis in different degrees of internal carotid artery stenosis can be objectively assessed, which are very helpful for the evaluation of clinical prevention and treatment. (J Intervent Radiol, 2018, 27: 447-450)

**【Key words】** fluid structure interaction; internal carotid artery stenosis; atherosclerosis plaque; hemodynamics

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2018.05.012

作者单位: 300140 天津市第四中心医院放射科

通信作者: 纪盛章 E-mail: jsz0549@163.com

脑卒中是一种受环境与遗传因素共同作用而缓慢形成的复杂疾病,20%由颈动脉粥样斑块性狭窄引起<sup>[1]</sup>。我国心血管疾病患者达 2.3 亿,脑卒中患者超过 700 万<sup>[2]</sup>。动脉粥样硬化确切发生和发展机制尚未完全清楚,较多研究认为局部流体力学改变可能起到十分重要的作用<sup>[3]</sup>。本研究将医学与流固耦合(fluid structure interaction,FSI)有限元分析有效结合,构建不同狭窄程度颈内动脉模型,利用流体力学参数阐释颈动脉狭窄局部与动脉粥样硬化发生和发展的关系,为临床动脉粥样硬化预后判断及治疗干预提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象与颈内动脉狭窄标准

选取 1 例 75 岁女性颈内动脉内膜轻度增厚患者,以颈部 CTA 检查医学数字成像和通信(DICOM)图像数据作为建模依据。颈内动脉狭窄程度评估根据北美症状性颈动脉内膜剥脱试验(NASCET)标准,其计算公式:狭窄率=狭窄远端正常直径-狭窄段最窄直径/狭窄远端正常直径×100%。

### 1.2 研究用软硬件

数值分析硬件:InterCore i5-2300 型计算机中央处理器(内存:8 G;SanDisk 固态硬盘:240 G;Windows 7 旗舰版 64 位操作系统)。数值分析软件:用于三维模型提取及制作的 17.0 医学影像交互式控制系统(MIMICS)软件,Geomagic Studio 三维正逆向工程软件,ANSYS workBench 15.0 有限元分析软件。

### 1.3 模型提取及制作

将 DICOM 图像数据导入 MIMICS 软件进行模型提取,保存为标准模板库(STL)文件,利用 Geomagic Studio 软件将模型光顺,在颈内动脉内膜增厚区域变形,将血管制作为 3 级不同程度狭窄——

轻度(25%)、中度(50%)、重度(75%),再进行曲面重建,完成长度均 50 mm 的 3 组模型。

### 1.4 FSI 有限元分析方法

采用 ANSYS workBench 15.0 软件对血液和血管壁模型以非结构四面体网格形式划分网格。参考 Jozwik 等<sup>[4]</sup>和 Chen 等<sup>[5]</sup>研究报道,设血液为不可压缩的牛顿黏性流体,血液密度为 1 060 kg/m<sup>3</sup>,运算控制方程为 Navier-Stoke 方程,流动方式为层流。国外相关文献显示血管管壁组织弹性模量为 0.6 mPa,管壁密度为 1 150 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.45<sup>[6]</sup>;人体血液正常黏滞系数为 3.5 cP<sup>[7]</sup>;血管入口条件为随心动周期时间变化的函数<sup>[8]</sup>,出口条件为自由流动出口,各出口相对压力设为零<sup>[9]</sup>。设心动周期为 1 s,计算步长为 0.01 s。在输出结果中分别检测 1 个心动周期内收缩期峰值(0.2 s)狭窄近端(A1)、狭窄喉部(A2)、狭窄远端(A3)和舒张末期(0.8 s)狭窄近端(B1)、狭窄喉部(B2)、狭窄远端(B3)壁面压力(wall pressure,WP)、壁面剪切力(wall shear stress,WSS)和血流速度。

## 2 结果

FSI 有限元分析结果显示,WP 在 1 个心动周期内狭窄颈内动脉整体分布自颈总动脉入口至颈内、外动脉出口处于递减状态,狭窄喉部和狭窄远端较低(图 1);WP 分布自狭窄肩部开始至狭窄远端急剧下降,且随狭窄程度增加其范围变化明显,中度狭窄的 A2、B2、B3 部位和重度狭窄的 A2、A3、B2、B3 部位出现负压(表 1)。

WSS 整体分布随血管形态变化而改变,在 1 个心动周期内,狭窄喉部 WSS 最大,且随狭窄程度增加明显升高(图 2)。WSS 值在 A2、B2 部位明显高于狭窄两端,且随狭窄程度增加明显升高,在 A1、A3

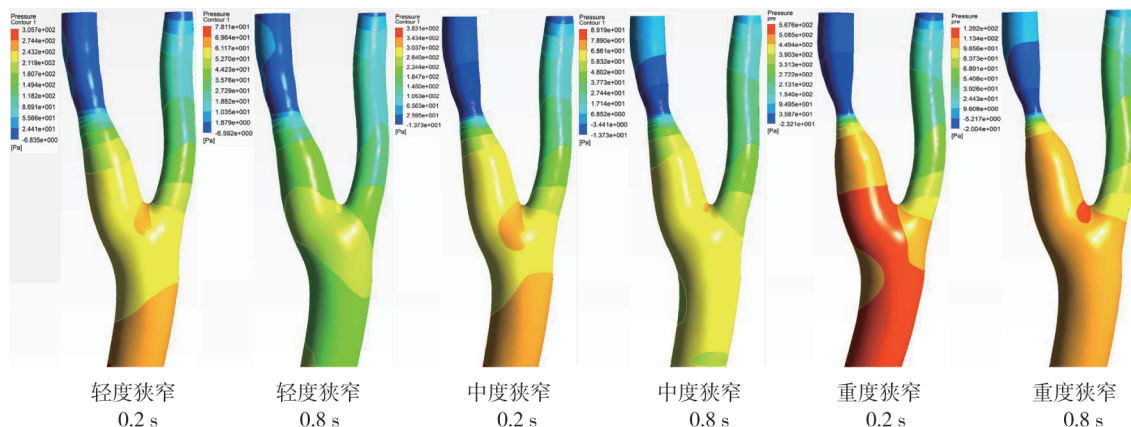


图 1 不同狭窄程度颈内动脉收缩期峰值和舒张末期 WP 值图

表 1 各部位不同狭窄程度 WP 值 Pa

部位	轻度狭窄	中度狭窄	重度狭窄
A1	196.01	261.90	458.95
B1	38.96	54.46	100.87
A2	62.16	-8.52	-4.12
B2	9.07	-6.81	-4.30
A3	19.84	2.01	-24.56
B3	1.84	-0.94	-6.31

部位均较低, B1、B3 部位最低(表 2)。

在 1 个心动周期内, 不同狭窄程度 A2 部位血流速度最快, 且随狭窄程度增加而提高; 狭窄远端

湍流随狭窄程度增加而越发明显(图 3)。血流速度数值分析看出, 不同狭窄程度 A2 部位流速值均最高, 舒张末期流速值均较低(表 3)。

表 2 各部位不同狭窄程度 WSS 值 Pa

部位	轻度狭窄	中度狭窄	重度狭窄
A1	2.24	2.10	1.99
B1	0.80	0.75	0.70
A2	9.87	16.92	27.37
B2	3.60	6.09	9.96
A3	1.71	1.39	1.20
B3	0.65	0.42	0.41

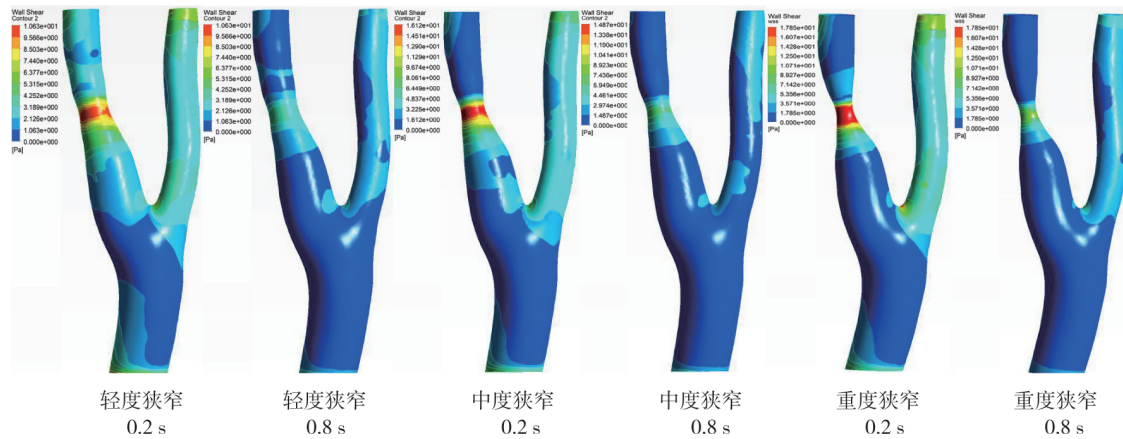


图 2 不同狭窄程度颈内动脉收缩期峰值和舒张末期 WSS 值图

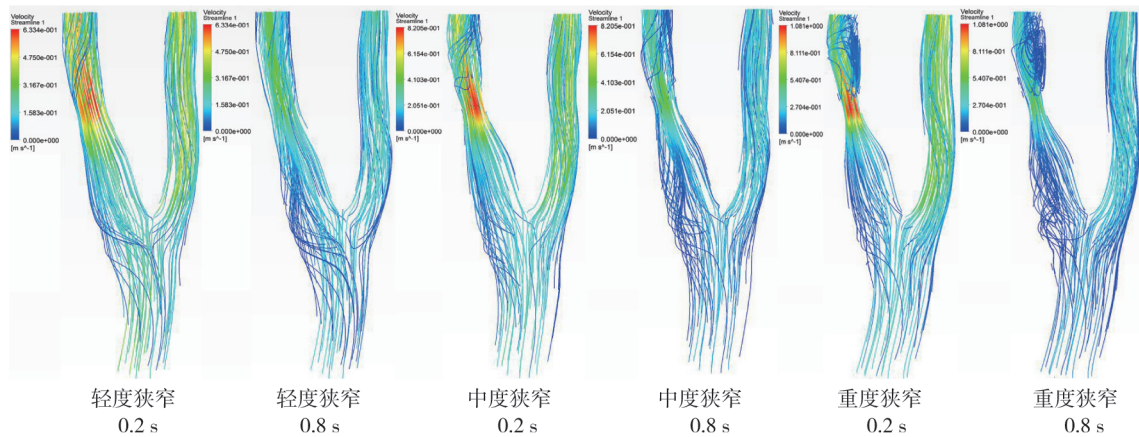


图 3 不同狭窄程度颈内动脉收缩期峰值和舒张末期血流线迹图

表 3 各部位不同狭窄程度流速 m/s

部位	轻度狭窄	中度狭窄	重度狭窄
A1	0.16	0.15	0.12
B1	0.08	0.07	0.06
A2	0.31	0.39	0.43
B2	0.15	0.18	0.19
A3	0.25	0.23	0.19
B3	0.12	0.10	0.08

### 3 讨论

#### 3.1 WP

本研究结果显示, 1 个心动收缩期内, 颈内动脉

狭窄局部 WP 发生剧烈变化, 中度狭窄 A2、B2、B3 部位和重度狭窄 A2、A3、B2、B3 部位出现负压, 这与既往研究报道<sup>[10-11]</sup>一致, 且重度狭窄 A3、B3 部位负压受 A2、B2 部位影响持续加大, 血液在此处发生倒流, 难以为下游脑血管内血液提供充足动力。对比轻、中、重 3 种狭窄程度 WP 可发现, 狭窄范围 WP 变化幅度随狭窄程度增大而增大, WP 值逐渐减小。狭窄喉部和远端 WP 降低, 血液流经颈内动脉总量明显减少, 脑部组织发生供血障碍, 引发缺血性脑卒中。通过 WP 数值分析发现, 随着狭窄程度



增大,缺血性脑卒中发生率明显升高。

### 3.2 WSS

WSS 大小是衡量血液流动对血管内壁组织影响的重要因素。WSS 变化影响内皮细胞功能,内皮因为其特殊位置,直接感受 WSS 变化,并将信息传递给毗邻细胞,释放活性物质,促进血管壁结构发生变化,以适应变化的力学环境。血管壁处于高 WSS 环境时,流经该区域的血小板易被撕裂并释放出细胞聚集活性因子,使血细胞局部聚集,产生动脉粥样斑块失稳因素,使斑块破裂脱落,进而堵塞血管<sup>[12]</sup>。分析本研究 3 种狭窄程度 WSS,可见 A2、B2 部位 WSS 值最大,且随狭窄度增加而加大,这样使斑块破损概率大为增加。Caro 等<sup>[13]</sup>认为,低 WSS 区域更易发生动脉粥样硬化,因为血脂质在该处滞留时间较长,易沉积形成局部狭窄。比较 3 种狭窄程度 WSS, A1、A3、B1、B3 部位均较低,且 A3、B3 部位最低,说明 1 个心动周期内 WSS 在狭窄远端均处于最低水平,也最易使狭窄处斑块延续发展,形成更大面积粥样斑块或狭窄加剧而闭塞血管。

### 3.3 血流速度

本研究图 3 中显示,血管中血液流速呈不均匀分布,不同狭窄程度 A2 部位流速值最高,且随着管腔狭窄程度递增而增加。有研究表明高速血流可将血液中致动脉粥样硬化因子,如单核细胞、脂蛋白等运送至靠近管壁区域,使得致病因子与血管壁接触时间延长<sup>[14]</sup>。狭窄部高速血流将致动脉粥样硬化因子运送至狭窄远端,且不同狭窄程度舒张末期均处于较低流速,使狭窄远端形成动脉粥样硬化环境。A3、B3 部位血流比较紊乱,湍流越来越明显,并随狭窄程度递增而增加,其 WSS 也随狭窄程度增加而减小。这些 WSS 较小低速湍流区域易增加内膜损伤,增强血清侧漏,出现所谓“浓度极化”现象<sup>[15]</sup>,导致血管壁物质积累和内膜增长,从而促进动脉粥样硬化斑块形成。

本研究基于 FSI 有限元分析,获取了颈内动脉狭窄局部 1 个心动周期内 WP、WSS 和血流速度值。随着狭窄程度增加,脑部供血量逐渐降低,缺血性脑卒中概率增加;狭窄喉部斑块易损程度增大;狭窄远端更易形成斑块发展环境。本研究显示颈内动脉狭窄处粥样硬化形成和发展与流体力学有密切关系,有助于预测颈内动脉狭窄局部动脉粥样硬化发生和发展,为临床预防及进一步干预提供依据。

### [参考文献]

- [1] Linfante I, Andreone V, Akkawi N, et al. Internal carotid artery stenting in patients over 80 years of age: single-center experience and review of the literature[J]. J Neuroimaging, 2009, 19: 158-163.
- [2] Wan LH, Zhao J, Zhang XP, et al. Stroke prevention knowledge and prestroke health behaviors among hypertensive stroke patients in mainland China[J]. J Cardiovasc Nurs, 2014, 29: E1-E9.
- [3] Kefayati S, Poepping TL. Transitional flow analysis in the carotid artery bifurcation by proper orthogonal decomposition and particle image velocimetry[J]. Med Eng Phys, 2013, 35: 898-909.
- [4] Jozwik K, Obidowski D. Numerical simulations of the blood flow through vertebral arteries[J]. J Biomech, 2010, 43: 177-185.
- [5] Chen J, Lu XY. Numerical investigation of the non-Newtonian pulsatile blood flow in a bifurcation model with a non-planar branch[J]. J Biomech, 2006, 39: 818-832.
- [6] Valencia A, Baeza F. Numerical simulation of fluid-structure interaction in stenotic arteries considering two layer nonlinear anisotropic structural model[J]. Int Commun Heat Mass, 2009, 36: 137-142.
- [7] Chandran KB, Rittgers SE, Yoganathan AP. 生物流体力学-人体循环系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2014: 5.
- [8] Morgan VL, Gore JC, Abou-Khalil B. Functional epileptic network in left mesial temporal lobe epilepsy detected using resting fMRI[J]. Epilepsy Res, 2010, 88: 168-178.
- [9] Tan FP, Borghi A, Mohiaddin RH, et al. Analysis of flow patterns in a patient-specific thoracic aortic aneurysm model[J]. Comput Struct, 2009, 87: 680-690.
- [10] 刘莹,章德发,殷艳飞,等.颈动脉双向流固耦合模型非稳态血流数值分析[J].介入放射学杂志, 2015, 24: 885-889.
- [11] 陶钧,李克,刘永晟.颈动脉狭窄的血流动力学初步研究[J].中华脑血管病杂志·电子版, 2014, 8: 55-58.
- [12] Thim T, Hagensen MK, Falk E, et al. Wall shear stress and local plaque development in stenosed carotid arteries of hypercholesterolemic minipigs[J]. J Cardiovasc Dis Res, 2012, 3: 76-83.
- [13] Caro CG, Fitz-Gerald JM, Schroter RC. Atheroma and arterial wall shear. Observation, correlation and proposal of a shear dependent mass transfer mechanism for atherogenesis[J]. Proc R Soc Lond B Biol Sci, 1971, 177: 109-159.
- [14] Ewa B, Anna B, Elzbieta A, et al. Pre-treatment serum levels of interleukin-10, interleukin-12 and their ratio predict response to therapy and probability of event-free and overall survival in childhood soft tissue sarcomas, Hodgkin's lymphomas and acute lymphoblastic leukemias[J]. Clin Biochem, 2009, 42: 1144-1157.
- [15] 刘莹,罗院明,殷艳飞,等.动脉内流-固耦合作用下两相血流动力学数值模拟[J].介入放射学杂志, 2017, 26: 253-257.

(收稿日期:2017-05-31)

(本文编辑:边 倩)