

## ❖ 医学物理与工程学

## Numerical simulation for predicting effect of carotid artery stenting for treating severe carotid stenosis

ZHANG Ya<sup>1\*</sup>, ZONG Huiqian<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, WEI Haoye<sup>1</sup>, YANG Cun<sup>1</sup>

(1. Department of Medical Equipment, 2. Department of Neurosurgery, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China)

**[Abstract]** **Objective** To observe the value of numerical simulation for predicting effect of carotid artery stenting (CAS) in treatment of severe carotid stenosis. **Methods** DICOM CT angiography (CTA) data of a female severe right internal carotid artery stenosis patient who would undergo internal carotid artery stent implantation were reconstructed with Mimics and Geomagic software to obtain a three-dimensional model of carotid stenosis. Solidworks software was then used to simulate CAS and obtain a three-dimensional model of carotid artery after CAS. Finally, the hemodynamics of the model after simulated CAS were calculated with ANSYS FLUENT software, and relevant hemodynamic parameters were obtained to evaluate the therapeutic effect of the simulated CAS. **Results** Before simulated CAS, the blood flow velocity and wall shear stress of arterial stenosis were both high, while wall pressure was low, and secondary flow, vortex, reflux and flow separation were observed. The distribution of wall shear stress and wall pressure of carotid artery was uneven. The blood perfusion ratio of internal and external carotid artery was 0.34, of internal and common carotid artery was 0.25. After simulated CAS, the blood flow velocity and wall shear stress decreased, while wall pressure increased, and most of the secondary flow, reflux, vortex and flow separation disappeared. The distribution of wall shear stress and wall pressure of carotid artery became uniform. The blood perfusion ratio of internal and external carotid artery was 0.63, of internal and common carotid artery was 0.62. **Conclusion** Numerical simulation could effectively predict the efficacy of CAS for treatment of severe carotid stenosis before operation.

**[Keywords]** carotid arteries; stenosis; stents; numerical simulation; hemodynamics; angiography

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2021.12.027

## 数值模拟技术预测颈动脉支架植入术治疗 颈动脉重度狭窄效果

张 娅<sup>1\*</sup>, 宗会迁<sup>1</sup>, 王 萌<sup>2</sup>, 魏昊业<sup>1</sup>, 杨 存<sup>1</sup>

(1. 河北医科大学第二医院医学装备部, 2. 神经外科, 河北 石家庄 050000)

**[摘 要]** **目的** 观察以数值模拟技术预测颈动脉支架植入术(CAS)治疗颈动脉重度狭窄效果的价值。**方法** 采用 Mimics 和 Geomagic 软件对 1 例因右侧颈内动脉重度狭窄拟行颈内动脉支架植入术的女性患者的 CT 血管成像(CTA) DICOM 格式数据进行三维重建, 获得颈动脉狭窄三维模型; 再以 Solidworks 软件模拟 CAS, 获得术后颈动脉三维模型; 最后以 ANSYS FLUENT 软件计算模型血流动力学, 获得相关血流动力学参数, 评估模拟 CAS 的治疗效果。**结果** 模拟 CAS 前, 颈动脉狭窄处血流速度及壁面切应力较高而壁面压力较低, 且存在二次流、涡流、回流及流动分离; 颈动脉整体壁面切应力及壁面压力分布不均; 颈内、颈外动脉血流灌注比为 0.34, 颈内、颈总动脉血流灌注比为 0.25。模拟 CAS 后, 该

**[基金项目]** 河北省卫计委青年科技研究计划(20210730)。

**[第一作者]** 张娅(1988—), 女, 河北石家庄人, 硕士, 工程师。研究方向: 医学图像处理。

**[通信作者]** 张娅, 河北医科大学第二医院医学装备部, 050000。E-mail: ya6879@163.com

**[收稿日期]** 2020-07-31 **[修回日期]** 2021-09-24

处血流速度及壁面切应力均降低,壁面压力升高,且二次流、回流、涡流及流动分离基本消失;颈动脉整体壁面切应力及壁面压力分布较均匀;颈内、颈外动脉血流灌注比为 0.63,颈内、颈总动脉血流灌注比为 0.62。**结论** 采用数值模拟技术可于 CAS 前有效预测其治疗重度颈动脉狭窄的疗效。

**[关键词]** 颈动脉;狭窄;支架;数值模拟;血流动力学;血管造影术

**[中图分类号]** R543.4; R814.42 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2021)12-1874-06

缺血性脑卒中为全球常见疾病,严重威胁人类健康,且与颈动脉狭窄程度密切相关<sup>[1-2]</sup>。颈动脉支架植入术(carotid artery stenting, CAS)创伤小,术后患者恢复快,已成为治疗颈动脉狭窄、降低缺血性脑卒中风险的有效措施<sup>[3]</sup>。血流动力学参数有助于术前评估支架治疗效果,减少不必要的支架植入<sup>[4]</sup>。有学者<sup>[5-6]</sup>采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法建立血管模型,模拟颈动脉狭窄及支架植入,分析相关血流动力学参数,寻找影响动脉粥样硬化的关键因素。本研究基于颈动脉狭窄 CT 血管成像(CT angiography, CTA)构建颈动脉支架植入前、后的三维模型,观察血流动力学变化,以期实现术前评估 CAS 治疗颈动脉狭窄效果,为临床提供参考。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 图像来源于 2019 年 11 月河北医科大学第二医院 1 例因颈内动脉狭窄而拟接受颈内动脉支架植入术的 57 岁女性患者。以 Philips iCT 机采集 970 幅头颈部 CTA 图像,见右侧颈内动脉分叉处管壁混合斑块影,且管腔重度狭窄(70%以上),右侧颈外动脉分叉处管腔轻度狭窄,颅脑 CT 未见明显异常。

**1.2 颈动脉三维重建及模拟数值** 采用 Mimics、Geomagic、Solidworks 软件构建模拟 CAS 前、后血管模型。首先根据颈动脉 CTA 于 Mimics 软件中重建原始颈动脉狭窄模型,获得点云格式模型;之后采用 Geomagic 软件对模型进行修复转换,构建实体模型;最后采用 Solidworks 软件进行编辑修改,并手动于狭窄部位构建支架模型,以模拟 CAS,设定支架模型长度覆盖颈动脉狭窄段,其两端均超出狭窄区域,直径略大于颈动脉正常直径。见图 1。

**1.3 血流动力学分析** 分别计算模拟 CAS 前、后颈动脉分支模型的血流动力学参数。采用 ANSYS FLUENT 软件对颈内动脉流体域进行网格划分,行网格无关性分析,确定建立模型所需网格数(表 1 和图 2);之后设置模型材料属性,血液为不可压缩牛顿流体,密度 1 020 kg/m<sup>3</sup>,黏度 0.003 5 kg/ms,刚性壁面无滑移,入口速度 1 m/s,出口压力为 0 Pa<sup>[5]</sup>;最后根据纳维-斯托克斯动量[公式(1)]及质量守恒连续方程

[公式(2)]<sup>[5]</sup>进行 500 次稳态迭代计算,以收敛结果,并获得模拟 CAS 前、后颈动脉血流速度、血流量及壁面切应力等血流动力学参数,计算血流灌注比[公式(3)和(4)]。

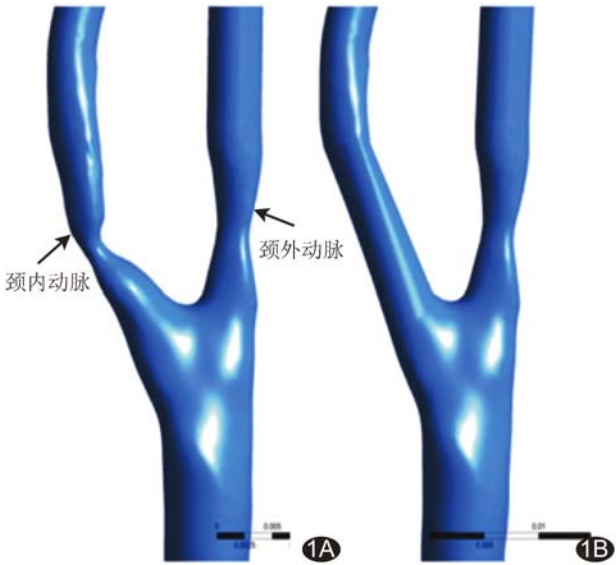
$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \nabla P + \mu \nabla v \quad (1)$$

$$\nabla v = 0 \quad (2)$$

F 为作用在单位质量流体上的体力,ρ 为流体密度,P 为应力张量,v 为流体速度,t 为时间,μ 为动力黏性系数,∇为拉普拉斯算子。

$$PP = \begin{cases} \frac{P_{inner}}{P_{external}}, & P_{inner} < P_{external} \\ \frac{P_{external}}{P_{inner}}, & P_{inner} \geq P_{external} \end{cases} \quad (3)$$

PP 为颈内动脉与颈外动脉血流灌注比,P<sub>inner</sub>为颈内动脉出口血流量,P<sub>external</sub>为颈外动脉出口血流量。



**图 1** 模拟颈动脉分支模型 A. 模拟 CAS 前,右侧颈内动脉起始处重度狭窄,右侧颈外动脉起始处轻度狭窄; B. 模拟 CAS 后,右侧颈内动脉起始处狭窄获得明显改善

**表 1** 模拟 CAS 前、后颈动脉分支模型网格数量

| 模型       | 网格数     |
|----------|---------|
| 模拟 CAS 前 | 5706741 |
| 模拟 CAS 后 | 5138526 |

$$AP = \frac{P_{inner}}{P_{inner} + P_{external}} \quad (4)$$

AP 为颈内动脉与颈总动脉血流灌注比,  $P_{inner}$  为颈内动脉出口血流量,  $P_{external}$  为颈外动脉出口血流量。

## 2 结果

**2.1 速度流线图分析** 模拟 CAS 前, 颈内动脉和颈外动脉狭窄处血流速度较高, 最高达 4 m/s, 且狭窄处出口及颈内动脉起始处(即颈动脉窦)存在涡流; 模拟 CAS 后, 颈内动脉狭窄及颈动脉窦涡流均消失, 颈外动脉仅存在轻度狭窄及涡流, 颈内动脉和颈外动脉血流速度均明显下降。见图 3。

**2.2 速度矢量图分析** 模拟 CAS 前, 颈内动脉狭窄段出口处血流出现流动分离, 即一侧呈喷射状、血流速度明显增加, 另一侧为血流低速区, 存在二次流现象, 形成回流及涡流; 颈外动脉狭窄处亦见类似现象, 但程度较轻。模拟 CAS 后, 颈内动脉血流恢复正常轴向对称性, 管腔中心血流速度较快, 靠近管壁处较慢, 回流及涡流均消失; 颈外动脉流动分离、二次流、回流及涡流现象均有所改善。见图 4。

**2.3 壁面切应力图分析** 模拟 CAS 前, 狭窄段血流流速较快处壁面切应力较高, 超过 200 Pa, 而血流低速处和回流处壁面切应力较低, 低于 10 Pa。模拟 CAS 后, 狭窄段壁面切应力降低, 整体分布较均匀, 其中颈外动脉狭窄处壁面切应力仅稍降低。见图 5。

**2.4 壁面压力图分析** 模拟 CAS 前, 狭窄段及其出口壁面压力较低, 局部血流冲击处壁面压力较高, 壁面压力分布不均; 模拟 CAS 后, 颈内动脉狭窄段及其出口壁面压力升高, 整体分布较均匀, 颈外动脉狭窄段及其出口壁面压力有所上升, 但仍存在负压。见图 6。

**2.5 血流灌注比** 模拟 CAS 前, 颈内、颈外动脉出口血流量分别为 1.13 ml/s 和 3.35 ml/s, 颈总动脉入口血流量为 4.48 ml/s,  $PP=0.34$ ,  $AP=0.25$ ; 模拟 CAS

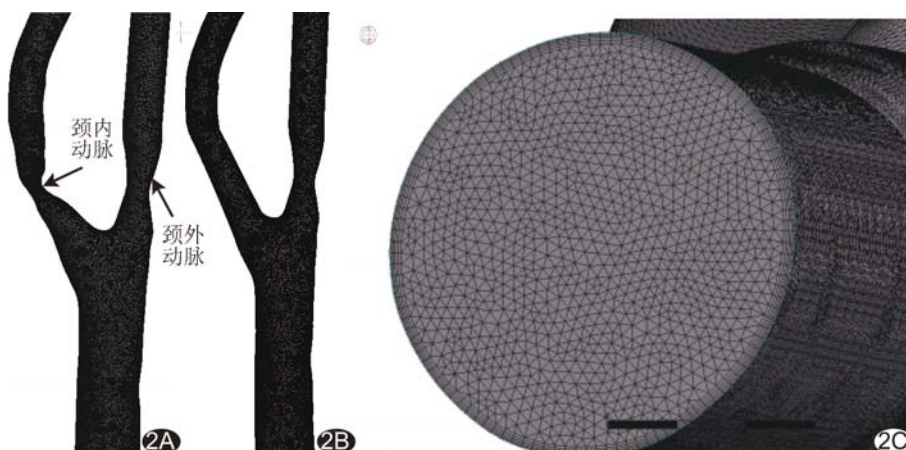


图2 颈动脉分支模型网格划分 A. 模拟 CAS 前; B. 模拟 CAS 后; C. 血管模型横截面图

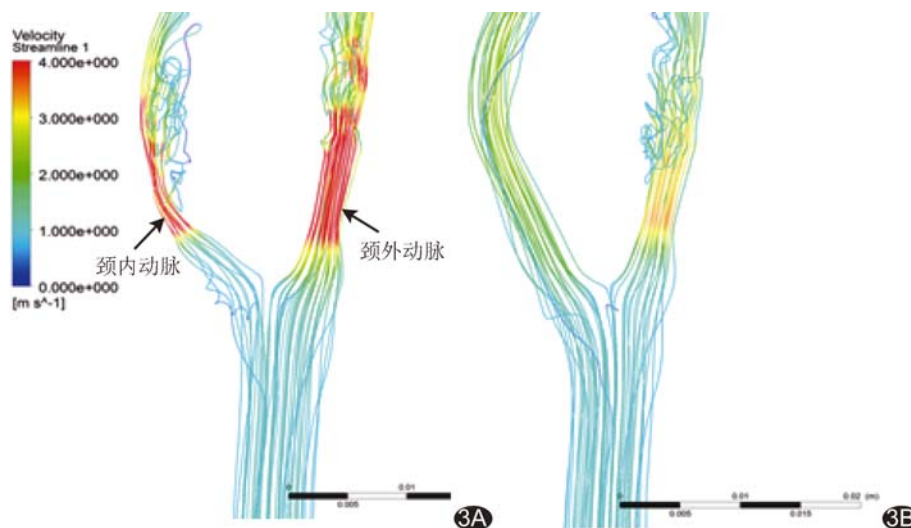


图3 颈动脉分支模型血流速度流线图 A. 模拟 CAS 前; B. 模拟 CAS 后

后, 颈内、颈外动脉出口血流量分别为 3.12 ml/s 和 1.95 ml/s, 颈总动脉入口血流量为 5.07 ml/s,  $PP=0.63$ ,  $AP=0.62$ 。

## 3 讨论

对于影像学检查证实颈动脉狭窄达 70% 并有明确症状和体征者, 以及颈动脉狭窄大于 70% 且可无明显症状者, 可在评估手术获益及风险前提下考虑行 CAS 治疗<sup>[7]</sup>; 但 CAS 后颈动脉血流动力学改变可诱发再狭窄、血栓形成、粥样硬化或栓塞等, 部分患者可因血流灌注下降而致脑血流量不足<sup>[8-9]</sup>。术前预测 CAS 治疗效果有助于使术后颈动脉血流动力学参数值位于合理范围内, 提高治疗有效性及安全性。

采用 CFD 可获得临床难以直接测量的血流动力学参数, 定量评估 CAS 治疗颈动脉狭窄后血流灌注, 有助于预测 CAS 疗效<sup>[10-12]</sup>。既往研究<sup>[13]</sup>结果显示,



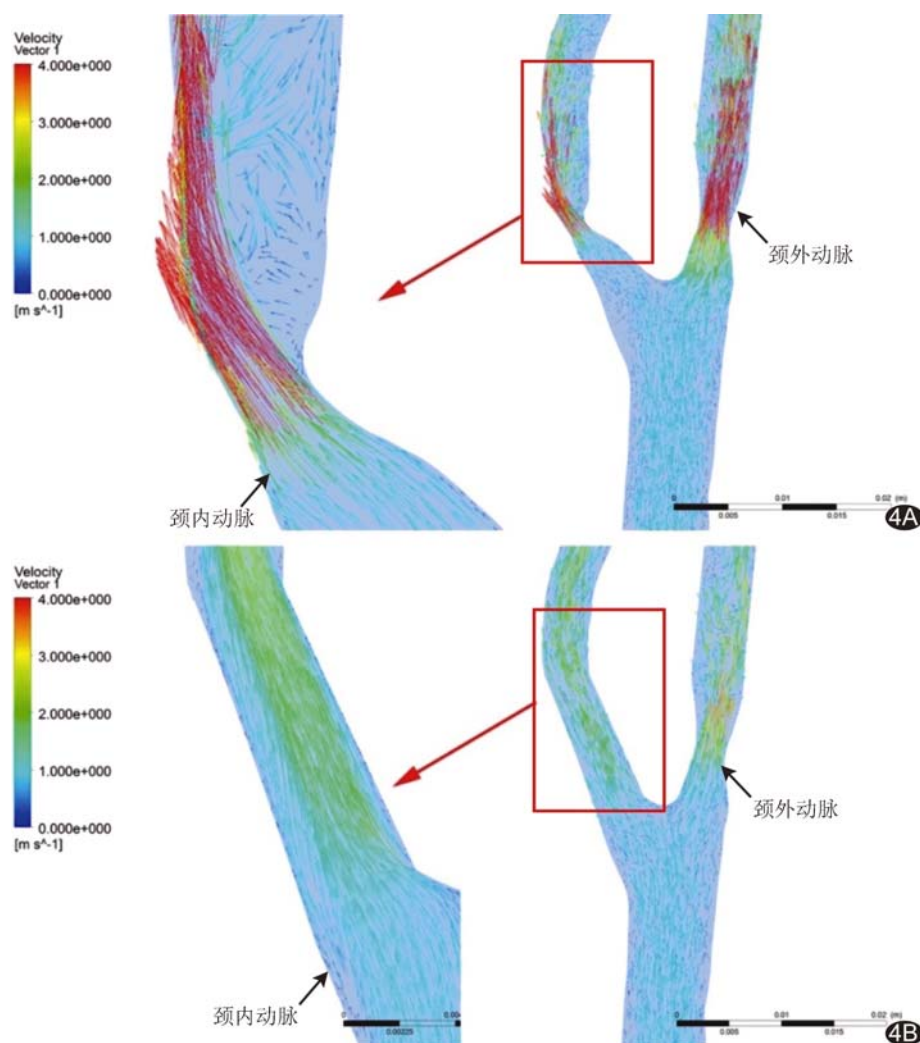


图 4 颈动脉分支模型血流速度矢量图 A. 模拟 CAS 前; B. 模拟 CAS 后

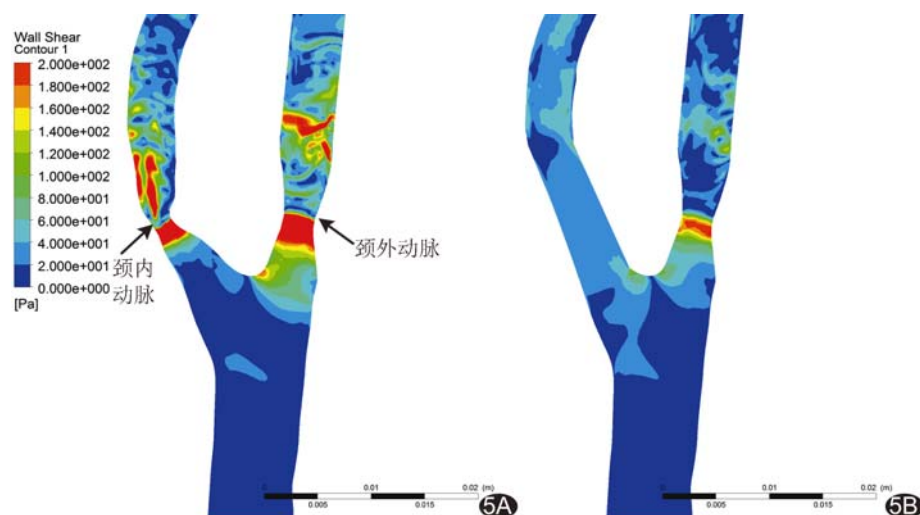


图 5 颈动脉分支模型壁面切应力图 A. 模拟 CAS 前; B. 模拟 CAS 后

颈动脉入口血流量为 250~380 ml/min。本例模拟 CAS 前颈总动脉入口血流量为 4.48 ml/s, 模拟 CAS

后为 5.07 ml/s, 血流量有所改善, 且与上述研究结果标准相符。UEMIYA 等<sup>[14]</sup>采用 CFD 方法计算 CAS 治疗颈动脉狭窄前、后血流动力学变化, 结果显示再狭窄组颈内动脉血流量与颈总动脉血流量之比为 43.5%, 而无再狭窄组则为 68.6%。本例模拟 CAS 前 PP 和 AP 分别为 0.34 和 0.25, 模拟 CAS 后分别为 0.63 和 0.62, 提示 CAS 后颈动脉血流灌注可获得明显改善。

动脉粥样硬化为动脉内膜炎症及脂肪物质沉积所致, 壁面切应力和壁面压力与其发病密切相关。血液流动可产生平行于血管管壁的壁面切应力, 流速减慢时壁面切应力减小, 此时易发生血脂沉积、血小板凝聚而形成斑块, 壁面切应力减小所致血液流动分离、涡流及回流等与斑块形成有关<sup>[15]</sup>; 而壁面切应力过高则可损伤内皮细胞, 导致斑块破裂、血栓形成, 干扰动脉血流动力学<sup>[16]</sup>。血流冲击血管壁可产生壁面压力, 狭窄处壁面压力随入口血流速度增大而减小, 壁面压力过低可造成血流动力不足, 颈内动脉血流量减少可致脑供血不足而引起缺血性脑卒中; 壁面压力过高则可损伤内皮细胞。动脉粥样硬化造成管腔狭窄, 狭窄处血流易致动脉壁内层破裂; 此时血液在壁面压力作用下冲击动脉壁, 可形成动脉夹层及动脉瘤等<sup>[17]</sup>。OUARED 等<sup>[18]</sup>观察采用虚拟支架治疗颈动脉瘤后的颈动脉血流动力学变化, 发现其平均流速、壁面切应力和壁面压力均有所下降。SCHIRMER 等<sup>[5]</sup>报道, 以 CAS 治疗颈动脉狭窄后, 原狭窄

处的涡流消失, 层流恢复, 植入支架处动脉壁面切应力降至接近正常水平。BERG 等<sup>[19]</sup>评估 2 例因动脉瘤而

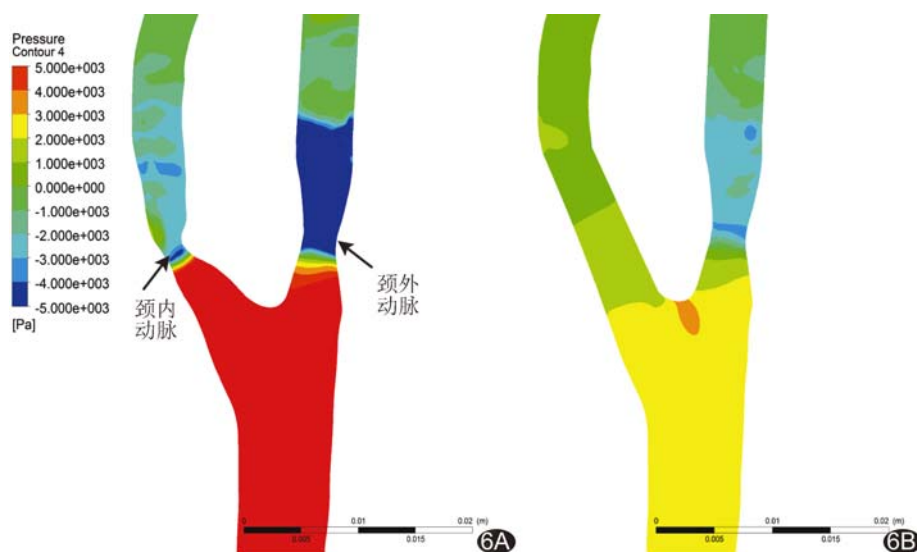


图 6 颈动脉分支模型壁面压力图 A. 模拟 CAS 前; B. 模拟 CAS 后

接受支架治疗患者,发现虽然其病情相似,但治疗结果差异较大,故认为植入支架治疗不一定能够达到预期效果,有效治疗的关键在于使血流动力学参数恢复正常范围。本研究模拟 CAS 后,颈内动脉狭窄消失,涡流明显减少并恢复层流,相关血流动力学参数均有所改善,颈内动脉狭窄段壁面切应力降低且壁面压力分布较均匀,PP 为 0.63,AP 为 0.62,提示 CAS 可获得良好的治疗效果。

本研究的主要不足:①建立三维模型时未考虑支架的几何结构及支架材料对疗效的影响,未对支架进行优化设计;②仅针对 1 例患者,有待扩大样本量进一步观察。

综上所述,采用数值模拟技术可于术前预测 CAS 治疗重度颈动脉狭窄的疗效。

## [参考文献]

- [1] 郭丽花,胡如英,龚巍巍,等. 脑卒中危险因素研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(17):4413-4416.
- [2] 解雨彤,李玉娟. 缺血性脑卒中的危险因素研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2019, 17(10):1493-1495.
- [3] 宋刚,焦力群,凌锋,等. 中国颈动脉支架置入术的文献评价与现状[J]. 中国脑血管病杂志, 2014, 11(3):113-117.
- [4] LI C H, GAO B L, WANG J W, et al. Hemodynamic factors affecting carotid sinus atherosclerotic stenosis [J]. World Neurosurg, 2019, 121:e262-e276.
- [5] SCHIRMER C M, MALEK A M. Patient based computational fluid dynamic characterization of carotid bifurcation stenosis before and after endovascular revascularization[J]. J Neurointerv Surg, 2012, 4(6):448-454.
- [6] DAI Y, LV P, JAVADZADEGAN A, et al. Hemodynamic analysis of carotid artery after endarterectomy: A preliminary and quantitative imaging study based on computational fluid dynamics and magnetic resonance angiography [J]. Quant Imaging Med Surg, 2018, 8(4):399-409.
- [7] 林浩,朱庆斌,倪小佳,等. 中国神经血管手术防治卒中相关指南的系统评价[J]. 中国脑血管病杂志, 2018, 15(4):169-176.
- [8] WANG F, LIU Y, WANG M, et al. De novo aneurysm formation after wingspan stenting of intracranial carotid stenosis: Computational hemodynamic analysis [J]. World Neurosurg, 2019, 126:212-215.
- [9] 贾耀辉,吕超. 支架辅助栓塞未破裂颅内动脉瘤术后颅内微缺血危险因素[J]. 中国介入影像与治疗学, 2021, 18(9):521-525.
- [10] YAO X, DAI Z, ZHANG X, et al. Carotid geometry as a predictor of in-stent neointimal hyperplasia—a computational fluid dynamics study[J]. Circ J, 2019, 83(7):1472-1479.
- [11] VUONG B, GENIS H, WONG R, et al. Evaluation of flow velocities after carotid artery stenting through split spectrum Doppler optical coherence tomography and computational fluid dynamics modeling[J]. Biomed Opt Express, 2014, 5(12):4405-4416.
- [12] MEGALY M, ALANI F, CHENG C I, et al. Risk factors for the development of carotid artery in-stent restenosis: Multivariable analysis[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2021, 24:65-69.
- [13] KAMBAYASHI Y, TAKAO H, SHINOHARA K, et al. Computational fluid dynamics analysis of tandem carotid artery stenoses: Investigation of neurological complications after carotid artery stenting[J]. Technol Health Care, 2016, 24(5):673-679.
- [14] UEMIYA N, LEE C J, ISHIHARA S, et al. Analysis of restenosis after carotid artery stenting: Preliminary results using computational fluid dynamics based on three-dimensional angiography[J]. J Clin Neurosci, 2013, 20(11):1582-1587.
- [15] 张玲,陈晓旭,周欣彤,等. 利用血流剪应力定量分析软件评价颈动脉粥样硬化[J]. 中国医学影像技术, 2014, 30(2):214-218.
- [16] ESHTEHARDI P, BROWN A J, BHARGAVA A, et al. High wall shear stress and high-risk plaque: An emerging concept[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2017, 33(7):1089-1099.
- [17] 刘潇,蒋涛,李敏,等. 高分辨率 MRI 评估自发性头颈动脉夹层与缺血性卒中的关系[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(2):225-228.
- [18] OUARED R, LARRABIDE I, BRINA O, et al. Computational

fluid dynamics analysis of flow reduction induced by flow-diverting stents in intracranial aneurysms: A patient-unspecific hemodynamics change perspective [J]. J Neurointerv Surg, 2016, 8(12):1288-1293.

[19] BERG P, SAALFELD S, JANIGA G, et al. Virtual stenting of intracranial aneurysms: A pilot study for the prediction of treatment success based on hemodynamic simulations [J]. Int J Artif Organs, 2018, 41(11):698-705.

## Ultrasonic diagnosis of mucoid degeneration of anterior cruciate ligament: Case report

### 超声诊断前交叉韧带黏液样变性 1 例

王海杰, 涂 滨, 江思桃

(佛山市中医院超声诊疗科, 广东 佛山 528000)

[Keywords] anterior cruciate ligament; ultrasonography; mucoid degeneration

[关键词] 前交叉韧带; 超声检查; 黏液样变性

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2021.12.028

[中图分类号] R686.5; R445.1 [文献标识码] B [文章编号] 1003-3289(2021)12-1879-01



图 1 左侧 ACL-MD A. 双侧膝关节超声声像图; B. MR 脂肪抑制质子密度加权成像; C. 关节镜图像; D. 病理图(HE, ×100) (箭示病灶)

患者男, 51 岁, 无明显诱因左膝前部疼痛 1 年, 行走及下蹲时加重, 外用药物(具体不详)及休息后可缓解, 但病情反复, 近半月来疼痛加重, 致行走困难; 既往无外伤、手术等病史。专科查体: 左膝部轻度肿胀, 屈膝受限, 关节屈伸未及摩擦感, 浮髌征(一), 麦氏征(一), 挺髌试验(一), 侧向运动试验(一), 抽屉试验(一), 关节稳定性好。实验室检查: 尿酸升高( $488 \mu\text{mol/L}$ ), 余未见明显异常。双侧膝关节超声: 左侧前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)明显肿胀, 前后径 9 mm(健侧 ACL 前后径 5 mm), 连续性好, 边界清晰, 回声均匀性与健侧相比略减低(图 1A), CDFI 无明显血流信号; 关节腔无积液, 浅表肌腱和韧带未见明显异常; 考虑左侧 ACL 黏液样变性(mucoid degeneration, MD)。左膝关节 MRI: 左侧 ACL 增粗肿大, 连续性完整, T2WI 及脂肪抑制质子密度加权成像信号增高(图 1B), 内见散在线状低信号, 考虑 ACL-MD。关节镜检查见左侧 ACL 增粗, 表面无包膜覆盖, 韧带内见多发黄色病灶组织(图 1C); 取病

灶组织送检, 并清除 ACL 病变组织。病理: 光镜下于致密纤维结缔组织中见多灶黏液样变性(图 1D), 诊断为左侧 ACL-MD。

**讨论** ACL-MD 是黏蛋白或黏多糖沉积于 ACL 胶原纤维束之间所致 ACL 变性、增粗的良性病变, 目前对其病因及发病机制仍存在争议。变性增粗的 ACL 张力增高, 且易与髁间窝发生机械撞击, 引起膝关节疼痛, 伴伸直或屈曲受限等。本病 MRI 表现为 ACL 弥漫性增粗, 走行连续, T2WI 及脂肪抑制质子密度加权成像呈弥漫高信号, 其间夹杂与韧带走行方向一致的条状低信号, 呈“芹菜梗样”。行膝关节超声检查时, 不应忽视位置深在的交叉韧带, 必要时可采用低频探头观察 ACL 形态及其结构。本例超声发现患侧 ACL 与健侧相比明显肿胀增粗、回声减低, 但连续性完整、边界清晰, 与 ACL 损伤后连续性中断、走行异常及边界不清等表现不同, 提示 ACL-MD 可能; 进一步行 MR 检查提示符合 ACL-MD。为治疗本病, 行关节镜下清理 ACL 病变组织及髁间窝扩大成形术可有效缓解症状, 改善膝关节功能。

[第一作者] 王海杰(1991—), 男, 广东惠州人, 硕士, 医师。E-mail: 269070095@qq.com

[收稿日期] 2021-06-07 [修回日期] 2021-09-30