

文章编号: 1004-7220(2020)03-0284-05

右冠状动脉起源于左冠状窦的血流动力学分析

丛梦杨^{1#}, 赵慧慧^{2,3#}, 许明星⁴, 代顺⁵, 陈传智⁶, 邱建峰^{2,3}, 钱秀清⁷, 秦升学¹

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东第一医科大学(山东省医学科学院)放射学院, 山东 泰安 271016; 3. 山东第一医科大学(山东省医学科学院)医学工程技术中心, 山东 泰安 271016; 4. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 泰安 271016; 5. 上海交通大学医学院附属同仁医院影像科, 上海 200336; 6. 上海市东方医院医学影像科, 上海 200120; 7. 首都医科大学生物医学工程学院, 北京 100069)

摘要:目的 通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)分析右冠状动脉起源于左冠状窦(anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary artery sinus, AORL)的血流动力学参数,从而有效评估疾病。方法 选取正常右冠状动脉(right coronary artery, RCA)和AORL两例个体病例,在Mimics软件中重建两个病例的血管模型,并将模型导入ANSYS CFX软件中进行血流动力学模拟计算,比较正常和AORL两种模型的血流动力学情况。结果 AORL模型右冠状动脉入口截面具有较小的血流量($9.35 \text{ cm}^3/\text{s}$),有可能导致右冠状动脉下游供血不足;AORL模型右冠状动脉急性拐角处的压力(13.78 kPa)相比于正常模型右冠状动脉(14.9 kPa)较低;AORL模型壁面剪切力(12.83 Pa)大于正常模型(9.74 Pa);AORL模型血管壁变形量较大。结论 AORL入口流速及拐角处压力均比正常RCA小,从而可能导致缺血症状发生。研究结果对临床上有效评估缺血等疾病具有理论指导意义。

关键词:右冠状动脉;左冠状窦;血流动力学;血流速度;压力;壁面剪切力

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.03.004

Hemodynamic Analysis on Anomalous Origin of the Right Coronary Artery from the Left Coronary Artery Sinus

CONG Mengyang^{1#}, ZHAO Huihui^{2,3#}, XU Xingming⁴, DAI Shun⁵, CHEN Chuazhi⁶, QIU Jianfeng^{2,3}, QIAN Xiuqing⁷, QIN Shengxue¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. College of Radiology, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, Taian 271016, Shandong, China; 3. Center for Medical Engineer Technology Research, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, Taian 271016, Shandong, China; 4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Taian 271016, Shandong, China; 5. Department of Radiology, Tong Ren Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200336, China; 6. Department of Radiology, Shanghai East Hospital, Shanghai 200120, China; 7. Department of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China)

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-27

基金项目: 山东省泰山学者项目(ts201712065)

通信作者: 秦升学, 教授, 研究生导师, E-mail: qinshengxue01@163.com

#为共同第一作者

Abstract: Objective To analyze the hemodynamic parameters of anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary artery sinus (AORL) based on computational fluid dynamics (CFD), so as to make an evaluation of the disease. **Methods** A normal right coronary artery (RCA) case and an AORL case were selected. Two models were reconstructed in Mimics software and imported into ANSYS CFX software for hemodynamics simulation. The hemodynamics of normal RCA model and AORL model were compared. **Results** AORL model had a smaller volume flow ($9.35 \text{ cm}^3/\text{s}$), which might lead to insufficient blood supply downstream of the RCA; the pressure at the acute corner of AORL model (13.78 kPa) was lower than normal RCA model (14.9 kPa); the wall shear stress (WSS) of AORL model (12.83 Pa) was larger than that of normal RCA model (9.74 Pa); the total deformation of AORL model was relatively large. **Conclusions** The entrance velocity and pressure of AORL were lower than those of normal RCA, which might lead to ischemic symptoms. The research findings are of theoretical significance for the effective evaluation of ischemia and other diseases in clinic.

Key words: right coronary artery (RCA); left coronary artery sinus; hemodynamics; flow velocity; pressure; wall shear stress (WSS)

右冠状动脉起源于左冠状窦(anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary artery sinus, AORL)属于冠状动脉起源异常的一种,部分患者先天发育如此,但是可能直到青少年或成年人时期才会在冠状动脉造影时偶然发现^[1]。研究发现,大多数患者临床上没有病症,只有部分患者会出现心肌缺血、心绞痛、晕厥、猝死等症状^[2]。起源异常右冠状动脉起始点的锐角、最大运动时肺动脉和主动脉的扩张、挤压右冠状动脉以及开口为裂缝状都可能会造成上述症状的发生^[3-5]。目前多数学者通过临床病例及解剖对 AORL 进行研究^[6-7],而鲜有针对这一问题开展血流动力学定量分析的报道。因此,通过计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)对正常和起源异常的右冠状动脉进行分析比较,有助于临床上判断起源于左窦的右冠状动脉是否会造成缺血等症状。

利用 CFD 方法模拟得到血管血流动力学特征参数,深入了解 AORL 造成的缺血,对临床上预防及治疗心肌缺血等症状具有重要意义。本文通过比较正常和起源于左冠状窦的两例真实人体右冠状动脉(right coronary artery, RCA)模型仿真结果,探究起源异常右冠状动脉血流动力学参数是否与缺血等临床症状有关。

1 材料和方法

1.1 医学数据与动脉模型建立

通过计算机断层扫描获取 1 例正常右冠状动脉和 1 例起源异常的右冠状动脉图像,将图像导入

Mimics 15.0 软件。通过鉴别计算机断层造影(computed tomography, CT)图像的灰度值设定分割阈值,截取部分主动脉以及全部冠状动脉,建立真实的动脉模型。利用 Geomagic Studio 2013 软件对初级模型的粗糙表面进行光滑处理,生成实体曲面保存,然后利用 SolidWorks 2016 生成分析所需模型(见图 1)。

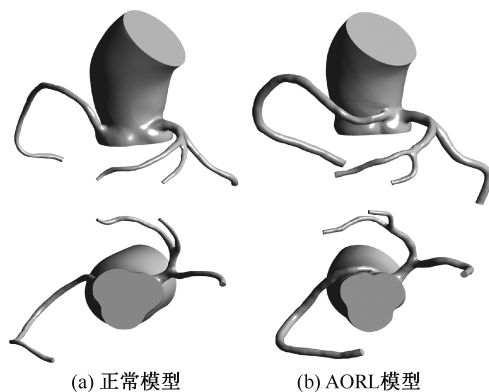


图 1 两例真实右冠状动脉模型

Fig.1 Two real right coronary artery (RCA) models

(a) Normal RCA model, (b) AORL model

1.2 材料属性

血液建模为牛顿流体,并假设为均匀不可压缩,黏度为 $3.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,密度为 $1060 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[8]。血管壁假设为各向同性线弹性材料,密度为 $1.15 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量为 5 MPa ,泊松比为 0.45 ^[9]。

1.3 边界条件

为比较正常右冠状动脉和起源异常右冠状动脉之间的区别,将入口流量设置为定值,以左心室

最大出口速度 1 m/s 的点作为仿真入口速度^[10]。根据正常冠脉流量为升主动脉 4%，将升主动脉出口压力设置为 105 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)，冠状动脉出口压力设置为 98 mmHg^[11-12]，壁面条件设置为无滑移。血管壁每个端口面轴向位移设置为 0 mm。

1.4 网格划分和数值模拟

用 ICEM CFD 19.0 进行网格划分,在模型的几何结构中生成 1 个非结构化四面体网格。流体部分网格的最大、最小尺寸分别设置为 1 mm 和 60 μm。设置膨胀层为 5 层,增长率为 1.2。固体网格尺寸设置为 0.1 mm。使用 ANSYS Workbench 19.0 软件进行单向流固耦合分析。固体部分利用 ANSYS Mechanical 解决,流体部分利用 ANSYS CFX 解决。流动控制方程为连续方程和不可压缩的 Navier-Stokes 方程。

2 结果

2.1 血流速度对比

比较正常与起源异常的右冠状动脉血流速度矢量分布可知,针对起源于左窦的右冠状动脉的速度相比于正常冠脉在末尾处较小,极有可能会造成缺血(见图 2)。

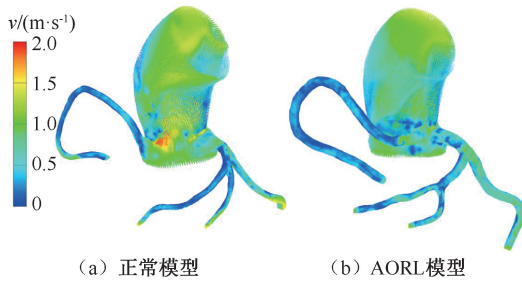


图 2 不同 RCA 模型速度矢量图
Fig.2 Velocity vector maps of different RCA models

(a) Normal RCA model, (b) AORL model

比较两个模型右冠状动脉入口速度的剖面云图可知,较大的速度位于中心附近,而临近血管壁的速度接近于 0,主要是因为对于充分发展的血流来说,在垂直于血流方向的血管截面上的血流速度分布大致呈抛物线形式^[13](见图 3)。正常、AORL 模型的平均入口速度分别为 0.465、0.642 m/s,入口截面分别为 20.1、10.8 mm²,由此可以计算两个模型的体积流量分别为 9.35、6.93 cm³/s,表明起源

于左冠状窦的右冠状动脉其入口体积流量相对较小。

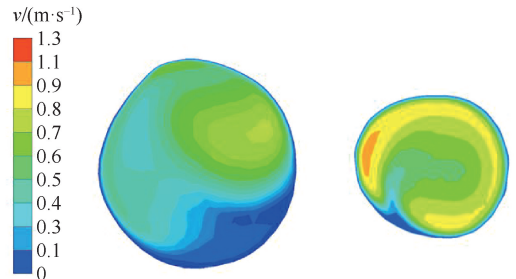


图 3 不同 RCA 模型右冠状动脉入口速度剖面云图
Fig.3 Entrance velocity nephogram of right coronary artery in different RCA models (a) Normal RCA model, (b) AORL model

2.2 壁面压力对比

根据边界层表面效应可知,在稳定流动中,流速大的地方壁面压力小,而流速小的地方壁面压力大^[13]。由图 4 可知,壁面的速度最小,其压力较大,AORL 模型右冠状动脉整体压力显著低于正常模型。分别截取两个模型从右冠状动脉起始点开始约 30 mm 右冠状动脉,采取 5 点取样法(选取上、下、左、右、中 5 个点)计算平均壁面压力。结果表明,正常、AORL 模型右冠状动脉起始点部分的平均压力分别为 14.91、13.8 kPa。

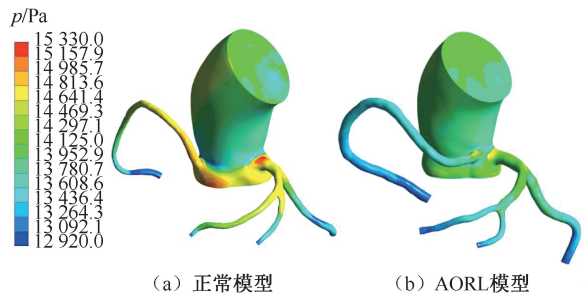


图 4 不同 RCA 模型壁面压力分布云图
Fig.4 Wall pressure nephogram of different RCA models (a) Normal RCA model, (b) AORL model

2.3 壁面剪切力对比

正常模型右冠状动脉根部拐角处壁面剪切力(wall shear stress, WSS)明显较高,其中接近右冠状动脉末尾由于血管狭窄以及血流速度突然变化,导致 WSS 明显升高[见图 5(a)];而 AORL 模型右冠状动脉起始处 WSS 相对整体冠脉较高[见图

5(b)]。由此可知, AORL 模型右冠状动脉根部 WSS 相比于正常模型较高。根据计算压力时所截取的位置, 采用 5 点取样法计算平均 WSS。结果表明, 正常、AORL 模型 WSS 分别为 9.74、12.83 Pa, 两者差异较大。

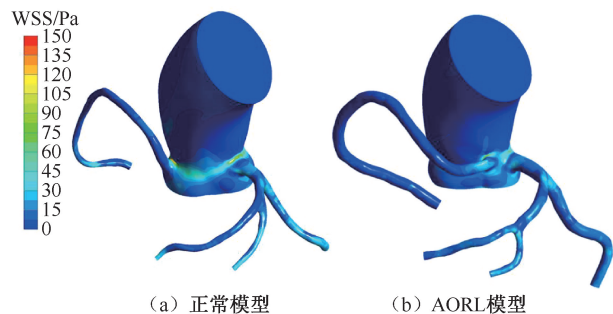


图 5 不同 RCA 模型壁面剪切力分布

Fig.5 WSS distributions of different RCA models

(a) Normal RCA model, (b) AORL model

2.4 血管壁变形量对比

正常右冠状动脉的变形量相对平缓, 没有太大的差别; 相比之下, 异常右冠状动脉血管起始处变形量较小, 而冠脉中部的变形量较大。异常冠脉相对于正常右冠状动脉变形量较大, 且在血管中部变形量最大(见图 6)。

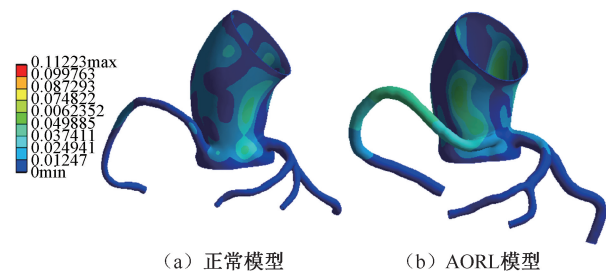


图 6 不同 RCA 模型总变形量分布

Fig.6 Total deformation distributions of different RCA models

(a) Normal RCA model, (b) AORL model

3 讨论

本文通过数值模拟比较正常右冠状动脉和起源于左冠状窦的右冠状动脉之间的血流动力学差异。结果表明, AORL 入口处的体积流量相对于正常右冠状动脉较小, 这可能会导致下游的血流量不足, 增大缺血的风险; AORL 起始点处的急性起飞角会使壁面压力出现明显下降的现象, 这也会导致下

游供血不足, 从而引起缺血的症状; AORL 的 WSS 相比正常右冠状动脉较高, 主要是因为异常冠脉入口面积较小, 其血流速度较大而导致; AORL 的总变形量较大, 可能会对人体健康造成损害。

AORL 比左冠状动脉起源于右窦更为常见, 在各种报道中比例从 3:1 到 9:1 不等^[14]。AORL 在一般人群中发病率为 0.05% ~ 0.10%^[15], 虽然发病率非常低, 但是一旦发病就会导致心脏猝死等疾病^[16-17]。多数研究学者都是通过临床病例以及解剖来研究 AORL, 并且认为右冠状动脉起始点的锐角可能是导致缺血的原因之一^[18-19]。随着计算机技术的快速发展, CFD 逐渐成为血流动力学计算和分析的重要方法。研究者可以通过生物流体计算软件直观地观察到血管内部的三维流场细节, 获取所需的血流速度、壁面剪切力等血流动力学参数, 并且对临床具有一定的意义^[20]。因此, 本文采用 CFD 方法对 AORL 进行血流动力学分析。

结果表明, AORL 的入口截面面积及体积流量都较小, 可能是由于左右冠状动脉都从左窦发出, 并且发出位置较近, 将进入左冠状动脉的血液进行分流, 并且由于急性起飞角以及入口截面较小, 导致血液流入右冠状动脉较为困难, 最终导致流入右冠状动脉的血流量较少, 从而有可能导致下游供血不足。AORL 的拐角处压力也相对较低, 可能是由于急性起飞角导致的压力损失以及壁面血流速度较小而导致, 而 WSS 较大主要是拐角处速度变化较大引起, 使得下游血流量减少, 从而导致缺血的症状。与此同时, 异常右冠状动脉也会导致血管壁较大的变形量, 严重时可能会导致血管壁破裂从而危害人体健康。

本研究的局限性如下: ① 未使用整个心脏波动周期的入口速度进行分析; ② 忽略冠状动脉周围器官和组织的影响; ③ 没有进行双向流固耦合, 未考虑血管弹性对血液速度等参数的影响; ④ 仅仅分析了两个病例, 样本量过少。在后续研究中, 应收集更多病例进行分析, 并且可以考虑心脏波动周期作为入口速度进行双向耦合, 更加贴近真实人体冠状动脉情况。

4 结论

起源于左冠状窦的右冠状动脉在通常情况下

不会造成病人的一些症状,但一旦引起疾病可能会危及病人的生命安全。因此,通过 CFD 方法研究正常右冠状动脉与起源于左冠状窦的右冠状动脉血流动力学参数的差异,有利于临床上预测及评估病人的发病情况。本文通过 CFD 分析发现,异常右冠状动脉的入口血液体积流量较小,拐角处壁面压力也相对较低和壁面剪切力较大,这些血流动力学参数变化都会导致心肌缺血等病症。因此,CFD 在预防由于起源于左冠状窦的右冠状动脉而引起的心肌缺血等疾病方面有一定的临床意义。

参考文献:

- [1] BROTHERS JA. Introduction to anomalous aortic origin of a coronary artery [J]. *Congenit Heart Dis*, 2017, 12(5): 600-602.
- [2] HO JS, STRICKMAN NE. Anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary sinus: Case report and literature review [J]. *Tex Heart J*, 2009, 32(4): 305-308.
- [3] CHEITLIN MD, CASTRO CM, MCALLISTER HA. Sudden death as a complication of anomalous left coronary origin from the anterior sinus of valsalva: A not-so-minor congenital anomaly [J]. *Circulation*, 1974, 50(4): 780-787.
- [4] HIRONO K, HATA Y, MIYAO N. Anomalous origin of the right coronary artery evaluated with multidetector computed tomography and its clinical relevance [J]. *J Cardiol*, 2016, 68(3): 196-201.
- [5] TAYLOR AJ, BYERS JP, CHEITLIN MD. Anomalous right or left coronary artery from the contralateral coronary sinus: "High-risk" abnormalities in the initial coronary artery course and heterogeneous clinical outcomes [J]. *Am Heart J*, 1997, 133(4): 428-435.
- [6] MAVROUDIS C, DODGE-KHATAMI A, BACKER CL. Coronary artery anomalies [M]//*Pediatric Cardiac Surgery*. USA: Blackwell Publishing Ltd., 2013.
- [7] MOTOMURA H, YOKOKAWA M, FUKUNAGA H. Anomalous origin of the right coronary artery: First familial cases in Asia [J]. *Pediatr Int*, 2016, 58(11): 1232-1234.
- [8] 王枫, 刘有军, 丁金立, 等. 中央分流术中血管弹性壁和刚性壁对血管中血流动力学的影响 [J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 622-628.
- WANG F, LIU YJ, DING JL, *et al.* Hemodynamic comparison between elastic and rigid vessels for the central shunt [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 622-628.
- [9] WU JH, LIU GY, HUANG WH, *et al.* Transient blood flow in elastic coronary arteries with varying degrees of stenosis and dilatations: CFD modelling and parametric study [J]. *Comput Method Biomec*, 2015, 18(16): 1835-1845.
- [10] BONGERT M, GELLER M, PENNEKAMP W, *et al.* Simulation of personalized haemodynamics by various mounting positions of a prosthetic valve using computational fluid dynamics [J]. *Biomed Eng-Biomed Te*, 2019, 64(2): 147-156.
- [11] LIU X, PENG C, XIA Y, *et al.* Hemodynamics analysis of the serial stenotic coronary arteries [J]. *BioMed Eng Online*, 2017, 16(1): 127-143.
- [12] WIWATANAPATAPHEE B, WU YH, SIRIAPISITH T, *et al.* Effect of branchings on blood flow in the system of human coronary arteries [J]. *Math Biosci Eng*, 2012, 9(1): 199-214.
- [13] 李洋, 张叙, 李志勇, 等. 基于病例研究冠状动脉扭曲对血流动力学的影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 229-233.
- LI Y, ZHANG X, LI ZY, *et al.* Effect of coronary artery tortuosity on coronary hemodynamics based on case study [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 229-233.
- [14] ONG CS, CAMERON DE, JACOBS ML. Surgical management of anomalous coronary arteries [J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2018, 7(5): 604-610.
- [15] ALEXANDER RW, GRIFFITH GC. Anomalies of the coronary arteries and their clinical significance [J]. *Circulation*, 1956, 14(5): 800-805.
- [16] CHO SH, JOO HC, YOO KJ, *et al.* Anomalous origin of right coronary artery from left coronary sinus: Surgical management and clinical result [J]. *Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 63(5): 360-366.
- [17] HATA Y, KINOSHITA K, KUDO K, *et al.* Anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary sinus with an intramural course: Comparison between sudden-death and non-sudden-death cases [J]. *Cardiovasc Pathol*, 2015, 24(3): 154-159.
- [18] WALLASCHOFSKI H, EIGENTHALER M, LOHMANN T. Anomalous origin and interarterial course of right coronary artery associated with angina and proven ischemia [J]. *Int J Angiol*, 2014, 23(4): 271-274.
- [19] KOSAR P, ERGUN E, OZTÜRK C, *et al.* Anatomic variations and anomalies of the coronary arteries: 64-slice CT angiographic appearance [J]. *Diagn Interv Radiol*, 2009, 15(4): 275-283.
- [20] 白帆, 刘有军, 谢进生, 等. 血流动力学的医学应用与发展 [J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 677-683.
- BAI F, LIU YJ, XIE JS, *et al.* Recent development and application of hemodynamics [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 677-683.