

文章编号:1004-7220(2023)03-0417-03

· 述 评 ·

心血管生物力学专栏述评

邓小燕

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院;生物力学与力生物学教育部重点实验室;北京市生物医学工程高精尖创新中心,北京 100083)

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.03.001

本期《医用生物力学》心血管生物力学专栏共发表了8篇与心血管介入治疗相关的论文,涉及内容有冠脉粥样硬化斑块特征对心肌缺血的影响、颈动脉分叉处不同机械取栓术的数值模拟比对、腹主动脉瘤形态(瘤颈角度)对支架位移力的影响、主动脉夹层裂面发展预测、血管支架锥度/结构对径向支撑力的影响、肺动脉环缩术血流动力学数值仿真、冠脉支架介入治疗钙化斑块预处理的数值仿真、髂静脉压迫综合征血流动力学数值模拟研究。

1 评述

血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)是判断心肌缺血的金标准,然而FFR的获取成本高且有创,这便促使了无创FFR数值计算研究的发展。至今,无创 FFR_{CT} 计算仍然存在精度较低、计算时间过长等问题。而且,目前计算FFR一般不去考虑冠脉狭窄斑块特征(斑块组织结构、力学性质等),这样得到的 FFR_{CT} 显然会影响心肌缺血的判断。为此,席晓璐等^[1]评估了狭窄血管弹性及斑块类型(富脂、钙化)等病变特征对 FFR_{CT} (心肌缺血)计算的影响。结果发现,弹性壁血管 FFR_{CT} 计算结果大于刚性壁;在中等狭窄程度下,富脂斑块的 FFR_{CT} 大于钙化斑块。因此,钙化斑块更容易引发心肌缺血。该研究表明,计算 FFR_{CT} 时,必须考虑血管弹性以及斑块的特性。

机械取栓术是随着科技和材料进步新发展出来的技术。在急性栓塞发生时,通过介入手段,用

中间抽吸导管配合取栓支架通过拉取和抽吸,将血栓取出体外。支架取栓效果评价方法包括体外实验和数值仿真。体外实验模拟虽然能直观评估取栓过程,比较不同取栓支架的性能,但无法定量评估取栓过程中血栓和血管壁所受作用力。为了定量评估Solitaire支架(Medtronic公司,美国)对顽固性血栓的取栓效果,赵可佳等^[2]采用有限元方法,对单、双支架在理想颈内动脉Y形分叉处血栓的取栓过程进行数值仿真对比研究。仿真结果表明,相比于单支架取栓,采用Solitaire双支架才能有效防止分叉处血栓的移位,成功取出血栓。仿真结果提示,取栓过程中,血栓所受应力较高,存在断裂风险;动脉侧壁所受接触压力较大,存在损伤风险。基于此,作者认为,取栓支架的设计和使用应该考虑其柔顺性,在保证取栓效果的同时降低对血管壁的损伤。该研究采用的模型虽然比较简单,但所得结果对取栓支架设计和临床操作具有较为可靠的参考价值。

覆膜支架腔内隔绝术是主动脉瘤的常用介入治疗手段。覆膜支架治疗有两个最常见的问题:内漏(endoleak)和移位(migration)。内漏指的是血液通过支架与血管近远端缝隙、覆膜支架间的间隙和动脉瘤内的血管重新流入腹主动脉瘤内的现象。其中,血液通过支架与血管近端或远端缝隙流入瘤内(I型内漏)的现象最为常见,是腔内隔绝术最致命的不良事件之一。移位一般是由覆膜支架与腹主动脉之间的锚定不牢所造成。覆膜支架移位会

收稿日期:2022-05-10;修回日期:2022-05-12

通信作者:邓小燕,教授,E-mail: dengxy1953@buaa.edu.cn

造成I型内漏,也会累及/堵塞腹主动脉的分支血管。基于患者CT影像和数值仿真技术,赵一鸣等^[3]研究了近心端瘤颈角度对支架移位的影响。分析研究表明,严重的瘤颈成角可导致支架位移力显著增加,近端锚定区域减小,从而增加支架移位发生的可能性。该研究虽然还比较粗略(如位移力的计算只考虑了血流对支架内壁面产生的作用力),但研究结果具有重要临床应用价值,可为严重瘤颈成角患者手术方案选择/制定提供依据。

主动脉夹层(aortic dissection, AD)又称主动脉夹层动脉瘤,是一种高致死率的严重心血管急症。AD是由主动脉管壁内膜出现破口,血液由此进入动脉壁中层,形成夹层血肿,主动脉内膜和中膜逐渐延伸剥离,沿主动脉长轴方向扩展形成主动脉壁的真假两腔分离状态。为了研究主动脉夹层假腔扩展机制,韩涵等^[4]提出一种裂纹面内扩展的数值模拟方法,数值模拟结果表明,界面损伤的轴向扩展以张开型为主、环向扩展以滑移型为主;随着初始假腔径向深度增加,裂纹扩展方向由环向转变为轴向,且轴向损伤更趋近于纯张开型;随着初始假腔环向角度和轴向长度的增加,环向损伤更趋近于纯滑移型。AD有不同的类型,按DeBakey系统可分为I、II和III型。由于该研究使用的AD模型为理想化双层圆管模型,主动脉材料参数为双轴拉伸拟合数据,故这种基于内聚力的裂纹面扩展模型所得结果是否具有普遍性,还有待进一步验证。

临床上常规使用均一直径血管支架,但腹主动脉、颈动脉等大动脉具有较大锥度,常规均一直径支架的使用会带来许多问题。以颈动脉为例,由于颈总动脉直径一般比颈内动脉粗约30%,均一直径血管支架植入会对颈动脉窦和颈内动脉段造成过度扩张刺激,从而导致患者围术期发生严重血流动力学障碍。临床实践已经证实,锥形支架更适合像腹主动脉、颈动脉分叉这些部位的支架介入治疗。尽管如此,由于锥形支架是近年来开发出的一类新型血管支架,其结构和手术方案仍然需要进一步改进和优化。申祥等^[5]对用于冠脉狭窄的锥形支架相关力学性能开展系列研究,本期专栏报道的是该研究团队对一类不同连接方式的锥形血管支架径向支撑力学行为的有限元分析。研究结果表明,相比传统圆直支架,锥形支架的径向刚度会减小,且

随锥度增加,径向刚度会逐渐降低。支架的连接方式对支架的径向刚度影响甚微,在不改变支架连接形式的情况下,可以通过降低锥形支架的锥度来提高支架的径向支撑性能。

肺动脉环缩术(pulmonary artery banding, PAB)是一种过渡性肺动脉减压手术,适用于肺血流过多的先天性心脏病患儿姑息治疗。PAB术后肺动脉血流动力学特性与环缩宽度、位置及环缩程度密切相关。若环缩不当,患儿术后短期可出现缺氧、心律不齐等并发症,长期可出现肺动脉扭曲、心功能不全和肺血管发育不良等并发症。罗苇等^[6]通过构建不同环缩宽度的PAB模型,利用计算机数值模拟方法探索在环缩位置和环缩程度不变的情况下,环缩宽度对肺动脉血流动力学特性的影响。结果发现,环缩宽度的增加可减少主肺动脉内涡流形成,减少血流能量损失,故而减轻右心室负荷,有助于降低PAB术后早期并发症的发生。但环缩过宽会改变左右肺血流分配比,对患儿术后远期左右肺发育可能导致不良影响。因此,PAB环缩宽度的选择应同时兼顾血流能量损失和左右肺血流分配平衡。同时,该研究表明,血流动力学数值模拟分析可为个性化PAB手术规划提供参考。

切割球囊血管成形术是一种依靠带有金属刀片的球囊导管,扩张狭窄动脉,特别是钙化性斑块狭窄的介入心导管治疗技术。近年来,切割球囊被用来替代普通气囊,对钙化病变冠脉狭窄进行支架介入治疗的预处理,其效果较好,但如操作不慎,也会造成血管撕裂/穿孔。为了探讨切割球囊在浅部冠状动脉钙化病变预处理中的适用范围,李佳松等^[7]采用有限元计算仿真技术,以普通球囊为对照,分析研究了切割球囊对不同弧度、厚度和长度钙化斑块的作用效果。仿真分析结果提示,当钙化斑块厚度小于0.3 mm时,弧度为180°左右的钙化病变适合采用切割球囊,270°钙化斑块应该采用普通球囊;对于厚度大于0.3 mm的环状病变,不推荐使用普通球囊和切割球囊,建议采用其他血管成形术预处理方法,如血管旋磨术等。该研究工作对支架介入治疗的狭窄斑块预处理具有参考意义。

髂静脉压迫综合征泛指盆腔内的髂静脉受邻近组织(如髂动脉、脊椎)压迫所致静脉腔狭窄/闭塞。髂静脉压迫不仅会造成静脉回流受阻和下肢

静脉高压,也是下肢静脉瓣膜功能不全、浅静脉曲张和继发髂-股静脉血栓的重要原因。为了研究人体姿态对髂静脉压迫综合征血流特性的影响,李超群等^[8]基于1例髂静脉压迫综合征患者的CT静脉图像,建立了具有静脉嵴结构的髂静脉压迫综合征数值模型,计算分析了患者在平卧、坐姿和行走状态下的血流流场。数值模拟结果表明,坐姿和行走状态下产生的静脉高压与临床结果一致,平卧能缓解静脉高压;人体在3种姿态之间不断转换,可能会增加血栓形成的风险。

2 结语

作为生物力学领域的一个重要分支,血流动力学研究已走过六十余年的历程。随着医学影像和计算机数值模拟技术的快速发展,血流动力学领域的研究已步入临床应用,本期专栏介绍了部分临床应用场景。虽然专栏报道的工作所建模型还比较粗略,但研究结果和采用的方法对心血管生物力学的临床应用具有一定指导意义。需要特别指出的是,心血管生物力学临床应用的理论基础源于心血管病血流动力学成因的研究成果。心血管疾病诸如动脉粥样硬化、动脉瘤、血栓形成等大多好发于血管几何形状发生急剧变化的部位。在这些部位,血流受到极大干扰而产生流动分离及涡漩,学术界称此为心血管疾病的局部性现象。长期以来的研究发现,力学因素,特别是血流动力学因素在此局部性现象中起着非常重要的作用。因此,研究血液循环中力学因素作用及血管细胞/组织的生物学响应是研究心血管疾病发病机制不可或缺的一环,其研究成果最终必然会体现在心血管疾病的防治上。

参考文献:

[1] 席晓璐,李鲍,李娜,等. 冠状动脉病变特征对心肌缺血的影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 458-464.
XI XL, LI B, LI N, *et al.* Effects of coronary artery lesion characteristics on myocardial ischemia [J]. J Med

Biomech, 2023, 38(3): 458-464.

- [2] 赵可佳,蔡云寒,颜文涛,等. 颈内动脉Y形分叉处双支架并联合取栓术的有限元模拟[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 465-471.
ZHAO KJ, CAI YH, YAN WT, *et al.* Finite element simulation of double-stent parallel thrombectomy at Y-shaped bifurcation of internal carotid artery [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 465-471.
- [3] 赵一鸣,曹皓瑶,岳键金,等. 瘤颈角度对腹主动脉瘤腔内修复术后支架位移的影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 472-478.
ZHAO YM, CAO HY, YUE JJ, *et al.* Effects of aneurysmal neck angle on stent displacement after endovascular repair of abdominal aortic aneurysm [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 472-478.
- [4] 韩涵,郭宝磊,孙翠茹,等. 主动脉夹层裂纹面内扩展的数值模拟[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 479-486.
HAN H, GUO BL, SUN CR, *et al.* Numerical simulation of in-plane crack propagation in aortic dissection [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 479-486.
- [5] 申祥,王炎,孙鹏,等. 新型球扩式锥形血管支架的径向支撑力学行为[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 487-492.
SHEN X, WANG Y, SUN P, *et al.* Mechanical behavior of radial support of a novel balloon-expandable tapered stent [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 487-492.
- [6] 罗苇如,熊吉文,仝志荣,等. 环缩宽度对肺动脉血流动力学影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 493-499.
LUO WR, XIONG JW, TONG ZR, *et al.* Hemodynamic effects of banding width on pulmonary artery [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 493-499.
- [7] 李佳松,曹洪帅,李萌,等. 基于有限元分析切割球囊对冠状动脉钙化病变预处理效果[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 500-506.
LI JS, CAO HS, LI M, *et al.* Pretreatment effects of cutting balloon on coronary artery calcification based on finite element analysis [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 500-506.
- [8] 李超群,詹焱青,汪忠明,等. 人体姿态对髂静脉压迫综合征血流特性影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 507-513.
LI CQ, ZHAN YQ, WANG ZM, *et al.* Effects of human postures on flow characteristics in iliac vein compression syndrome [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 507-513.