

文章编号:1004-7220(2016)05-0431-06

维医沙疗对股动脉分支的血流动力学影响

布热比·依明, 富荣昌, 阿达依·谢尔亚孜旦, 迪丽娜尔·马合木提
(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: **目的** 研究维医沙疗对人体股动脉分叉血管血流动力学及受力的影响,进而揭示维医沙疗对人体股动脉血栓成因的作用机制。**方法** 在室内维医沙疗系统对受试者进行维医沙疗,用飞利浦便携式彩色多普勒超声诊断仪分别测试受试者维医沙疗前后的股动脉血流速度峰值、内径和阻力指数(resistant index, RI),并进行统计学分析;重构股动脉分支的三维流-固耦合有限元模型,采用 ANSYS workbench 模拟计算维医沙疗前后流场的血流速度、压力、壁面切应力和股动脉壁的应力、应变、总位移。**结果** 维医沙疗后股动脉血流速度峰值的平均值和内径分别增大了32.43%和2.63%,RI降低了4.88%,股动脉血流速度峰值和RI维医沙疗前后差异均具有统计学意义($P < 0.05$),股动脉内径维医沙疗前后差异没有统计学意义($P > 0.05$)。维医沙疗后股动脉血流速度、压力和壁面切应力最大值分别增大29.91%、68.52%和46.55%;维医沙疗后股动脉壁的总位移、应力和应变最大值分别增大65.85%、45.45%和44%。**结论** 维医沙疗对加快血流速度、降低RI有显著影响,能增大股动脉血管内径,从而改善股动脉内血液的循环;并且维医沙疗后股动脉壁面切应力、血流速度、压力以及股动脉壁所受应力、应变和总位移有所增大,分叉处的高压力区域有所减少,维医沙疗对降低股动脉粥样硬化及血栓形成有一定的积极作用。

关键词: 维医沙疗; 血流动力学; 流-固耦合有限元分析; 血管流场; 壁面切应力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.05.431

Hemodynamic effects from sand therapy of Uyghur medicine on the branch of femoral artery

YIMING · Burebi, FU Rong-chang, XIEERYAZIDAN · Adayi, MAHEMUTI · Dilinaer
(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Objective To study effects from sand therapy of Uyghur medicine on hemodynamics in femoral artery branch and stress, so as to further discuss the functions and mechanisms of Uyghur sand therapy for treatment of femoral artery thrombosis formation. **Methods** Uyghur sand therapy was conducted on the subjects by indoor Uyghur sand therapy system. The peak values of blood flow velocity, inner diameter and resistance index (RI) of femoral artery before and after receiving Uyghur sand therapy were measured by the ultra-portable Doppler Diagnostic Ultrasound System for statistic analysis. Three-dimensional fluid-solid coupling model of femoral artery branch was reconstructed, and blood flow velocity, pressure, wall shear stress in the flow field as well as the equivalent stress, strain, total displacement on femoral artery wall were simulated and analyzed by the ANSYS Workbench. **Results** After receiving Uyghur sand therapy, the mean peak values of blood flow velocity and inner diameter of femoral artery increased by 32.43% and 2.68%, while the mean values of RI decreased by 4.88%, which showed it had the statistical difference ($P < 0.05$). But no statistical difference was found in the inner diameter with or without Uyghur sand therapy ($P > 0.05$). Besides, the maximum values of blood flow velocity, pressure and wall shear stress increased by 29.91%, 68.51%, 46.54%, respectively, while the maximum values of equivalent stress, equivalent strain, total displacement on femoral artery wall increased by 65.85%, 45.45%,

收稿日期:2015-11-20; 修回日期:2015-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(31460245,81160458),新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2014211A005)。

通信作者:富荣昌,副教授,硕士研究生导师,E-mail:changrong2010@sina.com。

44%, respectively, after receiving Uyghur sand therapy. **Conclusions** Uyghur sand therapy can increase blood flow velocity and decrease RI obviously, and help to expand the inner diameter of femoral artery to make blood circulation inside improved. With Uyghur sand therapy, the shear stress, blood flow velocity, pressure as well as the stress, strain, total displacement on femoral artery walls also increase, meanwhile, high pressure area on femoral artery branch reduces to some extent, which shows it plays a certain positive role in reducing atherosclerosis and thrombus formation inside femoral artery.

Key words: Uyghur sand therapy; Hemodynamic analysis; Fluid-solid coupling analysis; Blood flow field; Wall shear stress

血栓疾病的发病率、复发率以及残疾率都相当高。研究认为,复杂的血液循环流动、低壁面切应力等不利的血流动力学因素会导致脉管内动脉粥样硬化斑块的形成^[1-3]。下肢出现血栓后就会引发下肢缺血性病变血管的管径狭窄,导致器官和组织发生缺血性变化^[4]。维医沙疗是将人体埋在热沙里面通过热、磁、力的综合作用来治疗疾病的一种天然治疗方法^[5],很多关节炎患者通过维医沙疗得到了较好的治疗效果^[6],其治疗原理是通过沙子的传热功能、生物矿物物理效应和电磁效应来起到温经散寒、活血化瘀、消肿止痛等作用^[7]。关节软骨退行性变与血液循环障碍有关^[8]。相关研究报道,维医沙疗可以扩张末梢血管,改善患病部位的血液循环及促进新陈代谢^[9]。因此,维医沙疗可能通过改善人体血液循环来预防动脉粥样硬化及血栓的形成,甚至对此类疾病有疗效,从而给股动脉粥样硬化与血栓疾病患者带来无损、无副作用的自然疗法。本文采用室内维医沙疗实验和有限元数值模拟计算的方法,从生物力学角度讨论维医沙疗对人体股动脉血流动力学的影响,从而揭示维医沙疗对人体股动脉血栓成因的作用机制。

1 材料与方法

1.1 受试者来源

受试者选用22~27岁年龄段的健康群体,来源于在校大学生,共计85人次,59人。其中,26位男生,身高172~176 cm,体重67~75 kg;33位女生,身高152~160 cm,体重46~60 kg。

1.2 实验方法

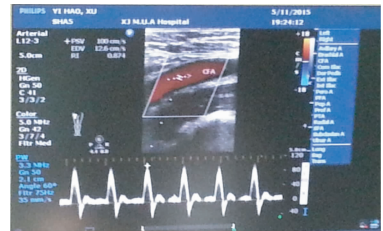
在室内维医沙疗平台中对受试者进行维医沙疗。沙体温度控制在45~50℃,埋沙厚度10~20 cm,每次维医沙疗时间为30 min,每天1次,15 d为一个疗程。

1.3 实验仪器与检测方法

为了更加科学地研究维医沙疗对血流动力学影响机制,制定详细的实验方案。利用新疆维吾尔自治区肿瘤医院B超室的飞利浦便携式彩色多普勒超声诊断仪CX50,并由该医院B超室专业人员分别测试每个受试者维医沙疗前后的血流速度峰值、血管内径和阻力指数(resistance index, RI)(见图1),测试部位为股动静脉、股浅动静脉、腘动静脉、胫前动静脉、胫后动静脉和足背动脉。本文主要研究维医沙疗对股动脉血流动力学的影响。



(a) 受试者



(b) 血流速度峰值的测试

图1 维医沙疗实验实例

Fig. 1 Experimental examples for Uyghur sand therapy

(a) The subject, (b) Testing the peak value of blood flow velocity

1.4 统计学分析

利用SPSS 19.0软件对股动脉血流速度峰值、RI和内径进行统计学分析,采用两独立样本 t 检验,使用均数±标准差进行描述, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义(见表1)。

维医沙疗前后股动脉内的血流速度峰值平均值分别为 92.51、122.51 cm/s, 维医沙疗后血流速度峰值平均值比维医沙疗前增大 32.43%, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$); 沙疗前后股动脉内径平均值分别为 0.76、0.78 cm, 维医沙疗后股动脉内径的平均值比维医沙疗前增大 2.63%, 差异没有统计学意义 ($P > 0.05$); 维医沙疗前后 RI 平均值分别为 0.82、0.78, 维医沙疗后 RI 平均值比维医沙疗前减少 4.88%, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$, 见表 1)。通过统计学分析可得, 维医沙疗能扩张股动脉内径, 但影响不是很明显, 对股动脉血流速度的增大和降低 RI 具有显著的影响。维医沙疗能加快血流速度, 减轻人体股动脉血管阻力, 改善人体股动脉血管中血液的循环, 从而预防和治疗由血液循环不佳导致的各种血管病。

表 1 维医沙疗前后股动脉血流数值比较 ($n=59$, * $P < 0.05$)

Tab.1 Comparison of femoral artery blood flow before and after Uyghur sand therapy

参数	维医沙疗前	维医沙疗后
流速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	92.51 ± 8.87	122.51 ± 16.98*
内径/cm	0.76 ± 0.11	0.78 ± 0.11
RI	0.82 ± 0.45	0.78 ± 0.49*

2 控制方程

2.1 血流的控制方程

血液可被视为不可压缩牛顿流体, 其连续性方程为^[10]

$$\nabla v = 0 \quad (1)$$

其 N-S 方程为

$$\frac{\partial v}{Dt} + (v \nabla)v = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v \quad (2)$$

式中: v 为血流速度, ρ 为血液密度, p 为血液压力, t 为时间。本文取 $\rho = 1.56 \text{ g/cm}^3$, 血液黏度 $4 \times 10^{-10} \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ^[11], 股动脉血液流动视为层流^[12]。

2.2 本构方程

将血管壁视为各项同性线弹性材料, 其本构关系为

$$\varepsilon_x = [\delta_x - \mu(\delta_y + \delta_z)]/E$$

$$\varepsilon_y = [\delta_y - \mu(\delta_x + \delta_z)]/E$$

$$\varepsilon_z = [\delta_z - \mu(\delta_x + \delta_y)]/E$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}, \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy} \quad (3)$$

式中: E , G 和 μ 分别为弹性模量、切变模量和泊松比; σ 为股动脉壁的正应力; τ 为切应力; ε 为应变。血管弹性模量为 9 MPa, 泊松比为 0.3^[13]。在血液与血管壁的接触面上还需要考虑流-固耦合的边界条件^[14], 即

$$\sigma_{ij}^t = \tau_{ij}^t, \quad V_i^t = v_i^t \quad (4)$$

式中: V_i 为股动脉壁的速度分量; v_i 为血液流场的速度分量; σ 为股动脉壁的正应力分量; τ 为流场的切应力分量; t 为流-固耦合 t 时刻的值。在血液和血管壁相接触的耦合面上血液壁面切应力和股动脉壁的正应力相等, 流场的速度和股动脉壁的分量相等。

3 模拟计算

在新疆医科大学第一附属医院 PET/CT 中心, 利用西门子 64 排 52 环 PET/CT, 对一名健全成年男性受试者的下肢进行断层扫描, 将所获得的 CT 数据导入医学图像处理软件 Mimics 10.01 中, 共计 1 121 个数据, 通过灰度值调整、区域增强、手动分隔等方法提取人体股动脉分支, 并用点云格式输出文件; 利用工程领域中广泛应用的逆向工程方法, 即逆向工程软件 Geomagic Studio 12 结合三维 CAD 软件 UG 8.5 重构股动脉分支的三维流-固耦合有限元模型(见图 2)。动脉血管壁厚度为 1 mm, 与文献[15]中所报道的股动脉壁厚一致。

将 59 个受试者维医沙疗前后血流平均速度值(见表 1)作为初始条件, 采用 ANSYS workbench 15.0, 通过将流体分析模块和静力学分析模块连接, 分别模拟血流流动和股动脉壁的受力情况, 由后处理功能和静力学分析模块得到维医沙疗前后的压力、速度、壁面切应力、应力、应变云图以及各云图所对应的数值, 并计算维医沙疗前后的压力、速度、壁面切应力、应力和应变的增量值, 分析这些量与维医沙疗之间的关系及其临床意义。

3.1 边界条件及约束条件

① 入口边界条件: 将受试者维医沙疗前后股动脉血流速度峰值的平均值(见表 1)作为入口速度边界条件; ② 出口条件: 出口血液流动已经稳定, 出口压力设为 0^[16-17]。将血管壁视为弹性体并进行流-固耦合模拟计算, 血液和血管壁的接触面设为流-固

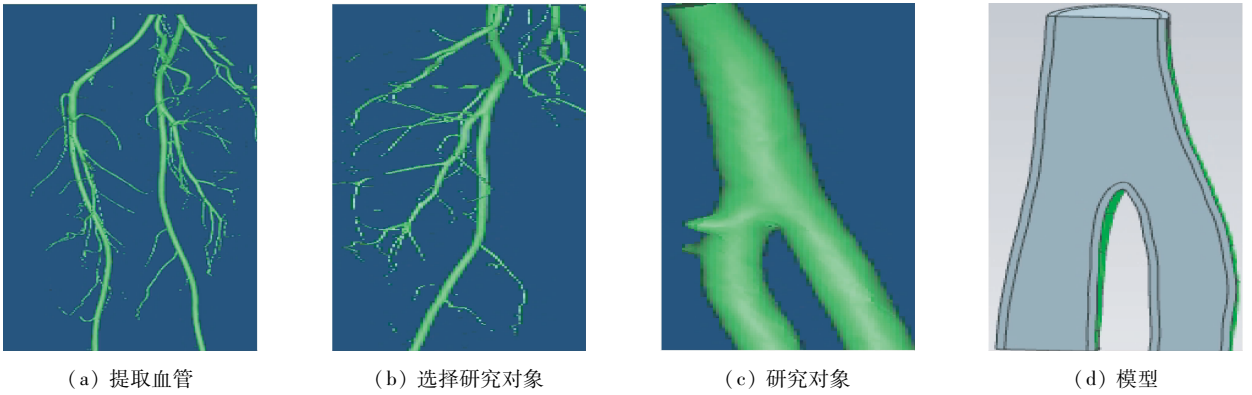


图2 股动脉有限元模型的建立过程

Fig.2 Reconstruction of the finite element model of femoral artery (a) Extraction of the blood vessel, (b) Selecting the subject, (c) Subject, (d) Model

耦合面,先计算流场,将流场计算得到的载荷通过耦合面施加到股动脉壁,从而得到股动脉壁所受的应力、应变和总位移等量;维医沙疗前后收敛精度均达到 10^{-6} ,计算结果可被视为收敛^[18]。

由股动脉血液流场模拟计算结果可知,最大速度和最小压力分布在出口处附近,最大压力和最小速度分布在分叉处附近,最大壁面切应力在耦合面附近(见图3)。相对于维医沙疗前,维医沙疗后的最大速度、压力和壁面切应力分别增大了 29.91%、68.52% 和 46.55% (见表2)。

表2 股动脉壁及血液流动参数的有限元模拟计算数结果

Tab.2 Results of finite element analysis on the femoral artery wall and blood flow parameters

参数	沙疗前	沙疗后	增量值
最大速度/($m \cdot s^{-1}$)	1.17	1.52	0.35
最大压力/Pa	651	1 097	446
最大壁面切应力/Pa	55.0	80.6	25.6
最大总位移/mm	0.41	0.68	0.27
最大应力/MPa	0.22	0.32	0.10
最大应变	0.025	0.036	0.011

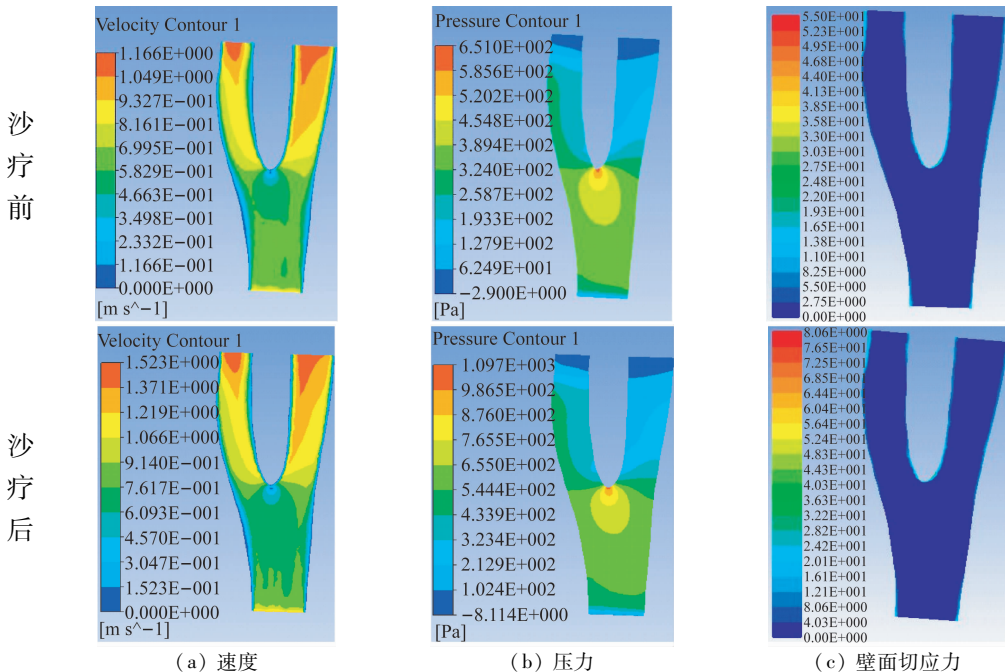


图3 维医沙疗前后流场模拟结果

Fig.3 Flow field simulation results before and after receiving Uyghur sand therapy (a) Velocity, (b) Pressure, (c) Wall shear stress

股动脉壁受力模拟结果显示,维医沙疗前后在分叉处附近应力、应变值有所增大,总位移在分叉两边变化较大(见图4)。相对于维医沙疗前,维医沙

疗后的总位移、应力、应变的最大值分别增大了65.85%、45.45%和44%(见表2)。

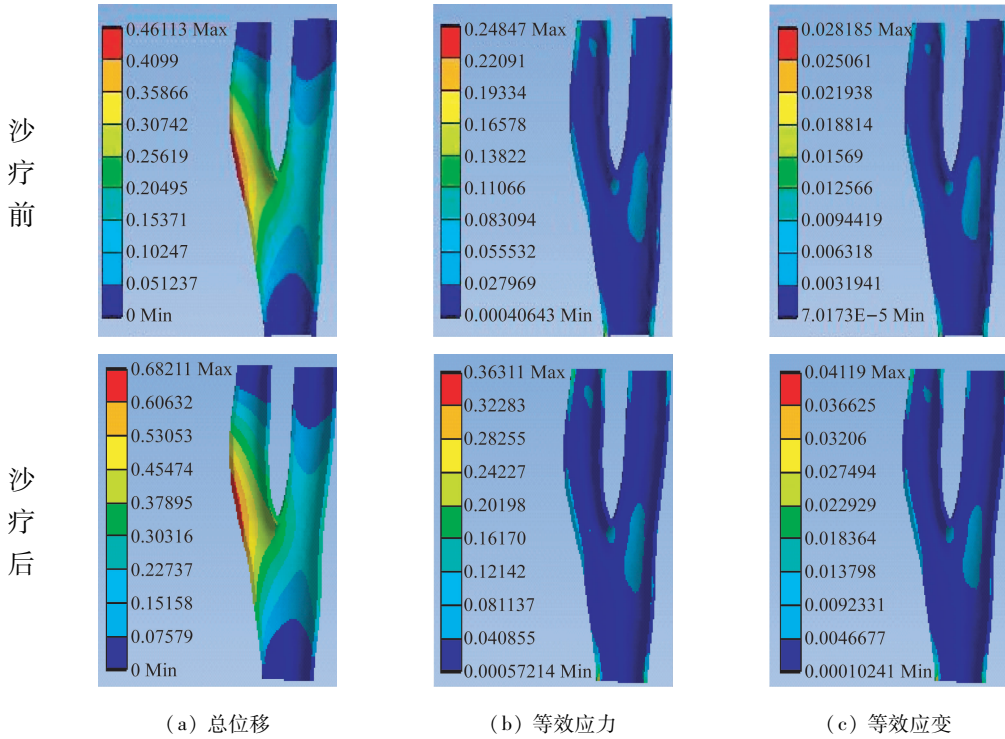


图4 维医沙疗前股动脉壁受力模拟结果

Fig.4 Stress simulation results of femoral artery wall before and after receiving Uyghur sand therapy

(a) Total Deformation, (b) Equivalent stress, (c) Equivalent strain

4 讨论

维医沙疗前后的模拟计算结果显示,流场的血流速度、压力、壁面切应力和股动脉壁的总位移、应力、应变的分布极为不均匀,股动脉分叉血管几何形状的复杂性和不规则性是导致这些量不均匀分布的因素。几何形状的改变使股动脉血液的流速随着位置的不同而改变,而且靠近分叉处与管壁处血流速度逐渐减慢,压力逐渐增大。研究表明,在动脉粥样硬化的形成发展过程中,低壁面切应力起着很重要的作用^[1-3,12]。

由维医沙疗后的血液流场模拟结果可知,流场的血流速度、压力及壁面切应力有所增大,维医沙疗后压力增大的同时在分叉处高压区域有所减少,这种变化趋势使血流在分叉处局部停留时间减少,避免血液中物质产生沉积。维医沙疗后人体股动脉

内径的微小变化以及血流速度的明显加快,导致壁面切应力增大,从而使股动脉壁的总位移及其所受的应力、应变明显增大,这种增大对减缓血小板沉积有一定帮助。

本文通过实验与有限元流-固耦合模拟计算的方法,进行基于维医沙疗的股动脉分叉血管血流动力学初步分析,并提出通过维医沙疗可以预防股动脉血栓形成的结论。血栓的成因极为复杂,维医沙疗是在热、磁、力的综合作用下治疗疾病的一种疗法;为了剖析维医沙疗对股动脉血流动力学与血栓的影响,还需综合考虑其他方面的因素,并在临床上进行验证。

参考文献:

[1] TANG BT, CHENG CP, DRANEY MT, et al. Abdominal

- aortic hemodynamics in young healthy adults at rest and during lower limb exercise: Quantification using image-based computer modeling [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2006, 291(2): H668-676.
- [2] 杨金有, 刘静, 俞航, 等. 髂主动脉血栓后与正常髂主动脉血流动力学数值模拟对比分析[J]. *生物医学工程与临床*, 2012, 16(1): 1-6.
- [3] 王汉琴, 白玲, 王燕华, 等. 切应力对与内皮细胞联合培养的血管平滑肌细胞粘附的影响及其机制[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(1): 4-7.
- WANG HQ, BAI L, WANG YH, *et al.* Shear stress-induced regulation of vascular smooth muscle cells adhesion in a coculture system with endothelial cells [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(1): 4-7.
- [4] 马瑞艳, 刘赵森, 张谭, 等. T型分叉血管中血液流动对动脉血栓形成的影响[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 98-106.
- MA RY, LIU ZM, ZHANG T, *et al.* Influence on the formation of thrombus from blood flow at the T-bifurcation of the artery[J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(2): 98-106.
- [5] 迪丽娜·马合木提, 卫荣, 欣味莲味·柳玻芙·尼库拉耶夫纳, 等. 维医沙疗皮肤组织的热效应分析[J]. *中华物理医学与康复志*, 2005, 27(7): 398-401.
- [6] 努尔亚·艾尼外尔江, 迪丽娜尔·马合木提. 非药物治疗对血液流变学和血流动力学的影响[J]. *新疆科大学学报*, 2015, 38(5): 649-651.
- [7] 尼亚孜·艾山. 新疆吐鲁番沙疗治疗风湿类疾病的研究[J]. *中国民族医药杂志*, 2002, 8(1): 21-22.
- [8] 卫荣, 迪丽娜尔·马合木提. 维医沙疗传热效应抗炎作用验证研究[J]. *中南大学学报: 医学版*, 2009, 34(1): 1-7.
- [9] 迪丽娜·马合木提, 哈木拉提·吾甫尔, 富荣昌. 生物力学与维医沙疗[J]. *中国民族医药杂志*, 2000, 6(3): 24-25.
- [10] 刘金龙. 分叉管脉动流的数值模拟与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2008.
- [11] 豆中强. 动脉血管中脉动血流的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2006.
- [12] 高巍. 血流动力学数值计算与模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文, 2009.
- [13] 邓小燕, 孙安强, 刘肖, 等译. *生物流体力学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [14] 范小弄. 心血管血液动力学数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2005.
- [15] 张梅, 张运, 高月花, 等. 颈动脉及股动脉内膜中膜层厚度正常值的对比研究[J]. *中国医学影像技术*, 2002, 18(1): 32-33.
- [16] SHAHCHERAGHI N, DWYER HA, CHEER AY, *et al.* Unsteady and three-dimensional simulation of blood flow in the human aortic arch [J]. *J Biomech Eng*, 2002, 124(4): 378-387.
- [17] YANG JY, YU H, LIU J, *et al.* Comparison of blood flow dynamics in thoracic aortic dissection and normal aortic based on CT images [J]. *BME Clin Med*, 2010, 14(5): 390-393.
- [18] STEINMAN DA, POEPPING TL, TAMBASCO M. Flow Patterns at the stenosed carotid bifurcation: Effect of concentric versus eccentric stenosis [J]. *Ann Biomed Eng*, 2000, 28(4): 415-423.