

文章编号:1004-7220(2019)04-0379-05

沙疗对人体弯曲股动脉血流动力学影响

韩晓科, 富荣昌, 章立红, 乔钰淇

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要:目的 研究沙疗对人体弯曲股动脉血流动力学的影响,从血流动力学角度进一步揭示沙疗的疗效机理。**方法** 以人体主动脉CT图像为依据,建立弯曲股动脉三维有限元模型,并以实验所测受试者心率、股动脉血流速度峰值和内径作为初始条件和边界条件进行有限元数值模拟,对比分析在流固耦合条件下沙疗前后弯曲血管血流场血流速度、压力和壁面切应力。**结果** 与沙疗前相比,沙疗后血管弯曲段纵向速度有较大提高,增幅为22.76%;二次回流速度明显减弱,减少了18.26%;壁面切应力减少2.01%。**结论** 沙疗会使血液流动性效果显著,并提高股动脉血液的流动性,预防动脉内血小板的沉积;沙疗后二次回流速度流动现象明显减弱,避免血液中物质产生沉积,临床上对预防动脉粥样硬化、血栓等各种血管疾病有积极作用。

关键词:流固耦合;壁面切应力;股动脉;沙疗

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.04.007

Effects of Sand Therapy on Hemodynamics of Human Flexural Femoral Arteries

HAN Xiaoke, FU Rongchang, ZHANG Lihong, QIAO Yuqi

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: **Objective** To study the effect of sand therapy on the hemodynamics of flexural femoral artery, and further reveal the therapeutic mechanism of sand therapy from the perspective of hemodynamics. **Methods** The three-dimensional finite element model of the curved femoral artery was established based on CT images of human aorta, and the data of heart rate, peak blood flow velocity and inner diameter of femoral artery measured by the experiment were used as initial conditions and boundary conditions to carry out finite element numerical simulation. The blood flow velocity, pressure and wall shear stress before and after sand therapy were analyzed and compared under fluid-solid coupling condition. **Results** Compared with treatment before sand therapy, the longitudinal velocity of the flexural segment of blood vessel increased significantly, with an increase of 22.76%. The secondary reflux velocity decreased significantly, with a relative decrease of 18.26%. The wall shear stress decreased by 2.01% after sand therapy. **Conclusions** Sand therapy had a significant effect on blood fluidity, by improving blood flow of femoral arteries, and preventing deposition of arterial platelets. The transverse flow phenomenon was obviously weakened after sand therapy, which could avoid the deposition of substances in blood and had a positive effect on the prevention of atherosclerosis, thrombosis and other vascular diseases.

Key words: fluid-solid coupling; wall shear stress; femoral artery; sand therapy

收稿日期:2018-07-04;修回日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31460245)

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

沙疗是一种新疆独特的通过埋沙治疗治病的方法,因副作用小、成本低深受广大群众的欢迎,尤其是对风湿性疾病以及血液循环类疾病的疗效显著。其原理是利用新疆吐鲁番地区自然形成带有磁性的沙子,通过传热、磁场作用及沙粒作用力等各方面综合作用于人体。因此,作为非药物疗法的沙疗具有副作用极小、改善血液循环的优势,对各种类型的风湿病具有独特疗效。自然沙场受地点、气候、天气等因素的影响比较大,为此,新疆大学建立了室内沙疗实验平台。刘龙等^[1]在此平台基础上探讨室内沙疗对人体股动脉血流动力学的影响。Fu等^[2]通过室内沙疗实验发现,沙疗对膝关节动脉血流动力学有显著影响。动脉类疾病多发生在动脉血管的分叉、弯曲和薄弱处^[3-4]。布热比·依明等^[5]在实验基础上利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法模拟计算在流固耦合条件下沙疗对人体股动脉分叉管血流动力学影响,进一步探讨沙疗对动脉粥样硬化成因的作用机制以及对血管破裂的影响。目前有关沙疗对弯曲动脉血流动力学的研究相对较少。弯曲血管相对于其他血管部分而言,存在一定程度的弯曲流动,漩涡流在接近于内壁处的流速较高,不利于血液循环的流动状态。弯曲动脉内的血液流动是生物流体力学的一个重要研究课题,故本文主要探讨沙疗前后人体股动脉弯曲段血管的流场和变形情况,从而进一步研究沙疗对血管疾病的疗效机理。

1 材料与方法

1.1 图像数据

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 采集图像,图像数据参数:平面分辨率为 512×512,像素为 0.5 mm,层间距为 0.5 mm。截取股动脉弯曲段相应的图像数据作为研究的血管区域。

1.2 实验数据

参考本课题组先前实验^[6],受试者为 22~27 岁健康群体,共计 85 人次,59 人。其中,26 位男生,身高 172~176 cm,体质量 67~75 kg;33 位女生,身高 152~160 cm,体质量 46~60 kg。处理股动脉血流速度、内径以及心率数据,根据

$$Re = \rho v d / \mu \quad (1)$$

分别计算沙疗前后的雷诺数。式中: v 、 d 分别为沙疗实验所得股动脉血流速度峰值以及内径平均值(见表 1)。沙疗前后的血液黏度以及密度均参考人体正常生理状态, $\mu = 4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\rho = 1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

表 1 沙疗前后股动脉血流数值比较($n = 59$)

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

参数	沙疗前	沙疗后
速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	92.51±8.87	122.51±16.98
内径/cm	0.76±0.11	0.78±0.11
心率	76.32±11.40	92.69±16.09
雷诺数	1 855.35	2 518.43
流动形式	层流	紊流
心动周期/s	0.789 0	0.651 6

1.3 方法

1.3.1 股动脉弯曲段几何重构 应用逆向工程方法^[7]将股动脉弯曲段进行分割和光滑处理,在保持原有生理解剖特征情况下构建血管的流体域(血流)三维重构模型。现有的医学 CT 图像中血流和血管区分相对比较困难,借鉴 Schulze-Bauer 等^[8]和 Martino 等^[9]的研究,应用逆向工程方法参考文献[10-11]中的股动脉研究,构建厚度 1 mm 的血管壁,得到血管壁三维几何模型。由于人体的复杂结构,股动脉血管的弯曲度也因人而异。

1.3.2 网格划分 通过 ANSYS workbench 15.0 有限元分析软件进行网格划分。在保证相同网格质量和单元大小的情况下,流体部分划分的四面体网格为 465 234 个单元,83 423 个节点;固体管壁模型划分的结构网格为 274 452 个单元,434 451 个节点。

1.3.3 边界条件 应用 ANSYS Workbench 15.0 进行流固耦合分析。边界条件和参数设定如下:

(1) 流体域。主动脉的入口条件设为瞬时血流速度^[6]。

$$v_{\text{前}} = 0.93 \sin(7.99t), \quad v_{\text{后}} = 1.23 \sin(9.70t)$$

模型各出口的压力设瞬态压强 $p = 0$ ^[12-13];血液黏度、密度均取为人体正常生理状态下的值:

$$\mu = 4 \text{ mPa}\cdot\text{s}, \quad \rho = 1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

(2) 固体域。血管壁设为不可压缩的各向同性材料^[15], $\rho_{\text{固}} = 1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。血管壁模型弹性模量 $E = 5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.45$ 。

1.3.4 流体和固体的运动方程 血液在生理条件

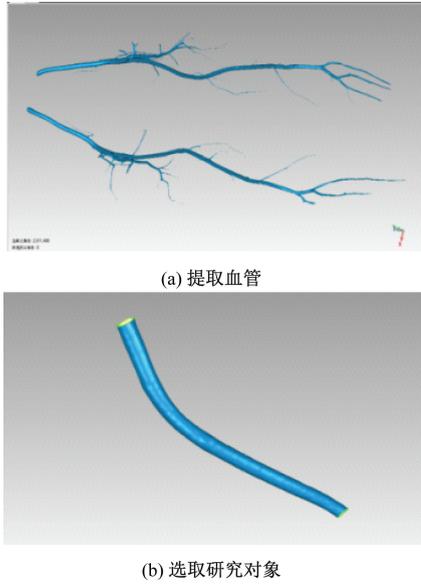


图1 弯曲段股动脉几何三维模型建立过程

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

下可以看作不可压缩流体^[16]。对不可压缩牛顿流体,本构方程的一般形式为:

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu V_{ij} \quad (2)$$

式中:

$$V_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

式中: V_{ij} 为应变张量; τ_{ij} 为应力张量; u_i 为流动速度; p 为静压; μ 为黏性系数,是常数。在高应变率下,血液可看作牛顿流体。

2 结果

假定在进口截面上流速均匀分布,进口区域边界层非常薄,则流速分布核心部分具有非黏结性流动特性。由于股动脉有弯曲段,存在一定程度的弯曲流动,接近于内壁处的流速较高,外壁处的流速则较低,边界层随流动而逐渐发展。由于离心惯性力的作用,流体将产生横向流动的二次流。

2.1 血管壁应力

沙疗前后弯曲段附近壁面切应力变化较为明

显。沙疗前,低壁面切应力在弯曲段内侧较为明显;沙疗后,低壁面切应力在弯曲段外侧较为明显。不同性别和弯曲度对血管壁面切应力影响有细小的差别,但并不显著(见图2)。

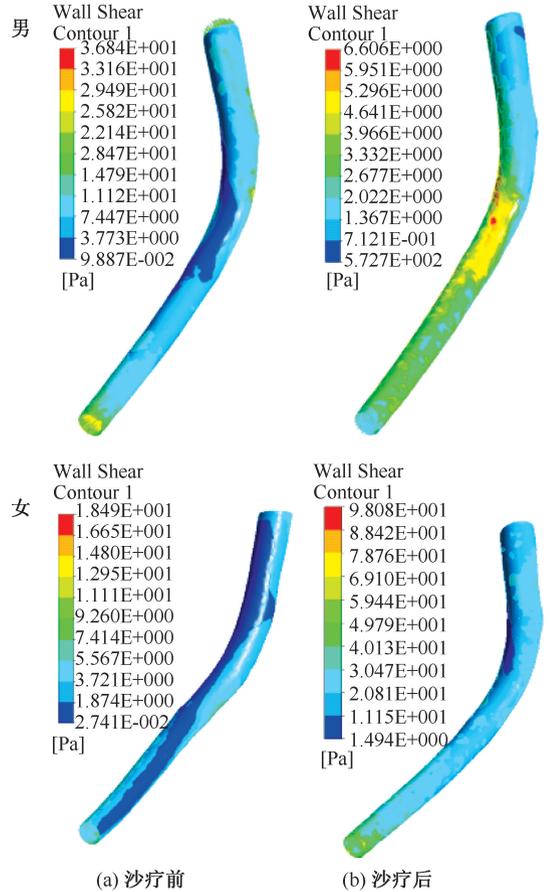


图2 血管壁面切应力分布

Fig.2 Shear stress distributions of vessel wall (a) Before sand therapy, (b) After sand therapy

2.2 血液流速

通过股动脉血液流场计算结果可知,速度变化明显的分布在弯曲段附近,最大、最小速度均分布在弯曲段附近。相对于沙疗前,沙疗后股动脉弯曲段的最大速度增加了22.76%。女性沙疗后血液流速相对沙疗前增加了13.24%。由于血管弯曲度变化并不大,故弯曲度引起的流速变化并不大(见图3)。

2.3 二次回流

由于血液流动存在一定程度的弯曲流动,故接近于内壁处的流速较高,外壁处的流速较低,边界层随流动而逐渐发展。在离心惯性力的作用下,流

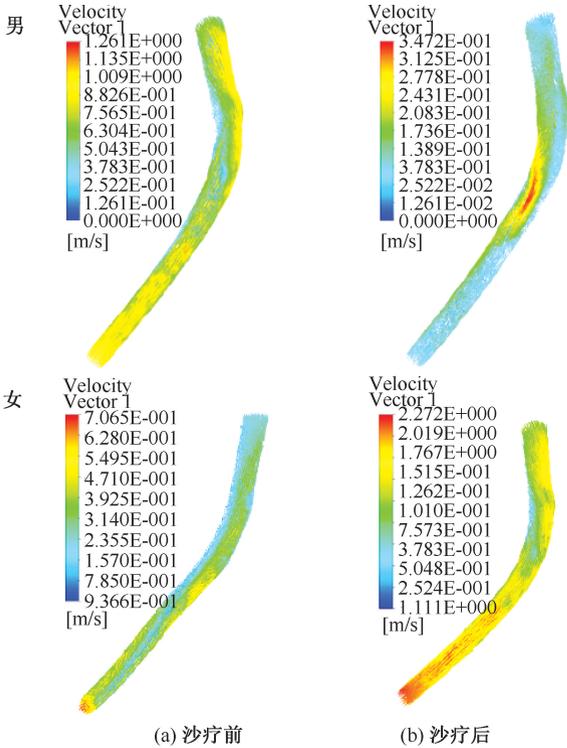


图3 血管血流速度分布

Fig.3 Velocity distributions of vessel blood flow

(a) Before sand therapy, (b) After sand therapy

体将产生横向流动的二次流。与沙疗前相比,沙疗后横向流动现象减弱比较明显,二次回流速度减少了18.26%。沙疗后女性较男性横向流动现象减弱明显。因此,弯曲度对二次流的影响较为显著(见图4)。

2.4 血管壁变形

由血管壁面变形分布可知,沙疗前后血管壁变形随心动周期变化情况相近,均是弯曲段变形较大,相对平直段变形较小。并且计算模型的结果显示,沙疗后血管弯曲段处均出现较大变形(见图5)。

3 讨论与结论

壁面切应力不仅与人体血液和血管壁之间的物质传输、营养物质运送、代谢废物排泄关系密切,还与血管壁厚度、动脉粥样硬化以及血栓形成有一定的相关性^[3]。

本文重点研究股动脉分叉管弯曲段的血流动力学特性。结果表明,沙疗后弯曲血管内侧切应力增加,既可以提高血液和血管壁之间的物质传输,

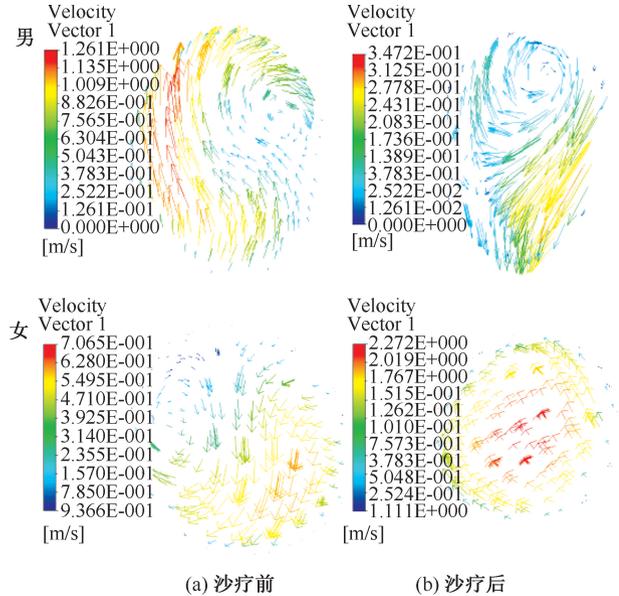


图4 二次回流分布

Fig.4 Distributions of vessel back-flow (a) Before sand therapy,

(b) After sand therapy

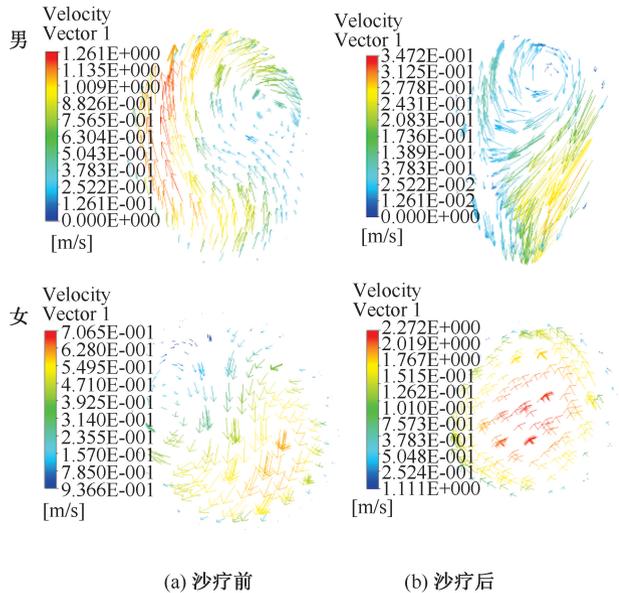


图5 血管壁变形分布

Fig.5 Deformation distributions of vessel wall (a) Before sand

therapy, (b) After sand therapy

同时对营养物质运送以及预防和改善血管壁变厚、动脉粥样硬化及血栓形成有一定的积极作用。

沙疗后血流速度增加,在弯曲段内侧速度明显增大,速度分布范围比较均匀,使得血流在流经几何形状复杂弯曲处局部的时间变短,血液存在一定

程度的弯曲流动,接近于内壁处的流速较高,外壁处的流速较低,边界层随流动而逐渐发展。由于离心惯性力的作用,流体将产生横向流动的二次流。比较沙疗前后二次流分布情况可知,沙疗后横向流动现象明显减弱,可避免血液中物质产生沉积,预防动脉粥样硬化、血栓等各种血管疾病。

本文关于人体股动脉弯曲血管沙疗前后流场和变形情况的分析结果,对探究沙疗对治疗血管疾病的作用具有指导意义。由于本文是基于牛顿流体开展的研究,下一步将基于非牛顿流体进行研究,更加符合实际情况。

参考文献:

- [1] 刘龙,迪丽娜尔·马合木提,富荣昌,等. 室内沙疗对人体股动脉血流动力学影响的实验研究[J]. 新疆医科大学学报, 2014, 37(1): 29-31.
- [2] FU RC, MAHEMUT D, TIYIPUJIANG RA, *et al.* Effect studies of Uyghur sand therapy on the hemodynamics of the knee-joint arteries [J]. *Biomed Mater Eng*, 2014, 24(6): 2381-2388.
- [3] 徐翔宇,郭攀,王小峰,等. 利用动网格技术模拟动脉粥样硬化发展过程[J]. 医用生物力学, 2017, 32(4): 336-341. XU XY, GUO P, WANG XF, *et al.* Application of dynamic mesh technique in the development process of atherosclerosis by numerical simulation [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(4): 336-341.
- [4] 刘有军,乔爱科. 血流动力学及其医学应用[J]. 医用生物力学, 2012, 27(5): 475-480. LIU YJ, QIAO AK. Hemodynamics and its medical application [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(5): 475-480.
- [5] 布热比·依明,富荣昌. 维医沙疗下股动脉双向流固耦合血流动力学数值模拟[J]. 中国生物医学工程学报, 2017, 36(4): 507-511.
- [6] 布热比·依明,富荣昌,阿达依·谢尔亚孜旦,等. 维医沙疗对股动脉分支的血流动力学影响[J]. 医用生物力学, 2016, 31(5): 431-436. BUREBI YM, FU RC, AYIDA XEYZD, *et al.* Hemodynamic effects of sand therapy in Uyghur medicine on the branch of femoral artery [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(5): 431-436.
- [7] 杨金有,俞航,刘静,等. 流固耦合分析分层的腹主动脉瘤模型[J]. 生物医学工程与临床, 2014, 18(4): 310-314.
- [8] SCHULZE-BAUER CA, MORTH C, HOLZAPFEL GA. Passive biaxial mechanical response of aged human iliac arteries [J]. *J Biomech Eng*, 2003, 125(3): 395-406.
- [9] DI MARTINO ES, GUADAGNI G, FUMERO A, *et al.* Fluid-structure interaction within realistic three-dimensional models of the aneurysmatic aorta as a guidance to assess the risk of rupture of the aneurysm [J]. *Med Eng Phys*, 2001, 23(9): 647-655.
- [10] 张梅,张运,高月花. 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.
- [11] 曾堃,乔爱科. 三种截面支架对动脉瘤血流动力学影响的比较研究[J]. 医用生物力学, 2012, 27(2): 220-225. ZENG K, QIAO AK. Comparative study on effects from three kinds of stents with different cross-section on aneurysmal hemodynamics [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 220-225.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LIU GY, WU JH, DHANJOO NG, *et al.* Hemodynamic characterization of transient blood flow in right coronary arteries with varying curvature and side-branch bifurcation angles [J]. *Comput Biol Med*, 2015, 64: 117-126.
- [15] 豆中强. 动脉血管中脉动血流的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [16] MAIER A, GEE MW, REEPS C, *et al.* Impact of calcifications on patient-specific wall stress analysis of abdominal aortic aneurysms [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2010, 9(5): 511-521.