

• 实验研究 Experimental research •

DeBakey Ⅲ型胸主动脉夹层红细胞流动大规模数值模拟

张金鑫, 张洪明, 张立翔, 张金辉

【摘要】 目的 模拟 DeBakey Ⅲ型胸主动脉夹层(AD)内红细胞流动,揭示红细胞流动规律,从颗粒视角解释 AD 危害,为治疗提供科学依据。**方法** 将 AD 血液区域模型,导入计算流体力学(CFD)软件进行大规模数值模拟。设置血液为含红细胞固态颗粒的 Lagrange 多相流,模拟红细胞颗粒运动,颗粒受力包含阻力、剪切升力、压力梯度力、虚拟质量力、重力,忽略热能传递。追踪红细胞轨迹与分布。**结果** 获得红细胞体积分数图与红细胞轨迹图。**结论** 假腔近心端膨胀处缺少新鲜血液涌入,血液内缓解症状有益物质与此处血管壁接触不良,导致血管壁易损伤,不易修复;此处存在低速旋涡,弯曲缠绕的红细胞轨迹显示血栓易形成。血栓可能进入真腔和假腔并黏附于血管壁,进而造成血管堵塞和破裂。AD 输血和红细胞输送能力较差。

【关键词】 主动脉夹层;多相流;数值模拟;颗粒;生物学特性

中图分类号:R692.5 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2018)-09-0865-05

Large-scale numerical simulation of erythrocyte flow in type III of DeBakey thoracic aortic dissection

ZHANG Jinxin, ZHANG Hongming, ZHANG Lixiang, ZHANG Jinhui. Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Technology, Kunming, Yunnan Province 650500, China

Corresponding author: ZHANG Hongming, E-mail: hmzhang8888@126.com

【Abstract】 Objective To numerically simulate the flow of erythrocytes in type III of DeBakey thoracic aortic dissection (AD) in order to clarify the rule of red blood cell flow within AD, and to explain the harmfulness of AD from the point of view of particles so as to provide scientific basis for clinical treatment. **Methods** The blood regional model of AD was imported into the computational fluid dynamics (CFD) software for conducting a large-scale numerical simulation. The blood was set as Lagrange multiphase flow containing solid particles of red blood cells. The particle forces in erythrocyte granule movement simulation, including resistance, shear lift force, pressure gradient force, virtual mass force and force of gravity, were calculated. The heat transfer was neglected. The track and distribution of red blood cells were followed. **Results** The erythrocyte volume fraction map and the erythrocyte track map were obtained. **Conclusion** There is lack of fresh blood inflow within the proximal expansion space of the false lumen, where the beneficial substances in the blood that can relieve symptoms just poorly contact with the vascular wall, which causes the vessel wall to be damaged easily and hard to be repaired. Besides, there is a low-speed whirlpool in the proximal expansion space of the false lumen, and the presence of curved and twining track of erythrocytes indicates that the thrombus is easy to form in this area. The thrombus may enter both true cavity and false cavity, and adhere to the wall of the blood vessels as well, which in turn leads to the blockage and rupture of blood vessels. The ability to transport blood flow and red blood cells of AD is poor. (J Intervent Radiol, 2018, 27; 865-869)

【Key words】 aortic dissection; multiphase flow; numerical simulation; particle; biological characteristics

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2018.09.013

基金项目:云南省科技计划项目(2014RA071)

作者单位:650500 昆明理工大学工程力学系(张金鑫、张洪明、张立翔);昆明市延安医院血管外科(张金辉)

通信作者:张洪明 E-mail: hmzhang8888@126.com

主动脉夹层(aortic dissection, AD)是主动脉腔内血液通过主动脉管壁上内膜撕裂口进入主动脉中膜外层或中外膜交界处的一种疾病,可在短期内引起主动脉破裂致患者死亡,或因夹层真腔被假腔压迫致狭窄甚至闭塞,真腔供血的重要脏器(肠管、肾脏、下肢等)出现缺血性改变,并发生严重并发症^[1-2]。采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对主动脉疾病作血流动力学分析,是近年 CFD 应用于生物医学领域的重要进展^[3-10]。一些研究对血液与血管壁进行流固耦合模拟,分析血管壁受力状态,这种研究思路将血液视为一般液体,忽视了血液生物特性对血管壁的影响^[3,7]。一些研究采用 Euler 多相流模型模拟血液,一定程度上从血液生物特性对红细胞分布进行分析,但该模型原理是将红细胞群视为流体微团,分析红细胞轨迹力不从心^[9-10]。本研究采用 Lagrange 多相流模型,对 AD 内血流进行动态模拟,分析红细胞分布及运动轨迹,从颗粒角度解释 AD 带来的危害,为治疗提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 AD 几何模型

根据患者胸部 CT 图像中 AD 数据,构建几何模型。撕裂口最长径为 15.68 mm,最短径为 11.72 mm,腹部动脉附近中膜出现 3 个再破口,再破口最长径不超过 8.18 mm,最短径不小于 4.00 mm,见图 1。CFD 软件中将区分 AD 模型血液出入口与壁面,划分网格,形成流体计算区域。共获取 550 万单元。

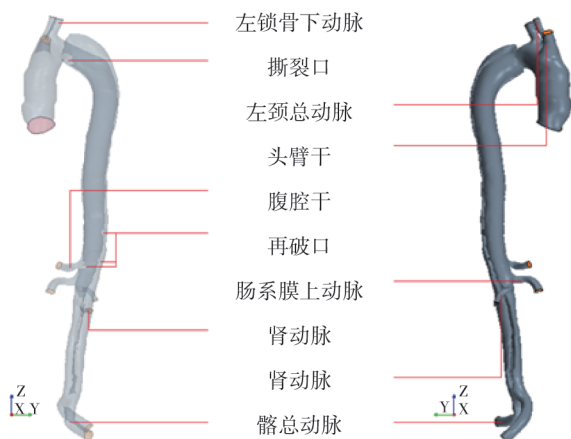


图 1 AD 三维图

1.2 数值方法

本次模拟采用 Lagrange 多相流模型进行计算,血浆与红细胞分别定义为连续相和颗粒相,以体积比 45 : 55 混合^[10]。入口速度引用某 AD 患者血液流

速测定数据^[2],重复 10 个周期。连续相采用非定常不可压缩流体的连续方程和 Navier-Stokes 方程,经有限体积法在空间上离散;扩散相采用中心差分方式,对流项用二阶迎风格式,时间项用隐式格式。连续相动力黏度为 $0.0035 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[10]。颗粒相基于 CFD 软件 Lagrange 多相流相关方程,对模拟进行设置。基本运动方程:

$$\frac{dr_p}{dt} = v_p - v_g \quad (1)$$

$v_g(x, t)$ 是网格速度, $v_p(t)$ 是颗粒绝对速度, $r_p(t)$ 是关于参照系位置。模拟采用笛卡尔坐标, t 在时间上进行离散,时间步为 0.001 s ,下标 p 表示颗粒相关项。物质粒子质量守恒方程:

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p \quad (2)$$

m_p 是颗粒质量, \dot{m}_p 是颗粒质量转移率,颗粒模拟红细胞,不涉及化学变化和物态变化, \dot{m}_p 数值是 0。物质粒子动量守恒方程的一般形式:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_s + F_b \quad (3)$$

F_s 表示作用于粒子表面的力, F_b 是体力。这些力依次被分解为:

$$F_s = F_d + F_p + F_{vm} \quad (4)$$

$$F_b = F_g \quad (5)$$

F_d 是阻力, F_p 是压力梯度力, F_{vm} 是虚拟质量力, F_g 是重力。阻力方程:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |V_s| V_s \quad (6)$$

C_d 是阻力系数,取值 $0.0175 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, ρ 是连续相密度,取值 $1090 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, V_s 是颗粒滑移速度, A_p 是粒子投影面积,颗粒半径 $8 \mu\text{m}$ ^[10]。压力梯度力方程:

$$F_p = -V_p \nabla P_{static} \quad (7)$$

V_p 是颗粒体积, P_{static} 是连续相压力梯度。虚拟质量力方程:

$$F_{vm} = C_{vm} \rho V_p \left(\frac{DV}{Dt} - \frac{dV_p}{dt} \right) \quad (8)$$

C_{vm} 是虚拟质量系数,默认值是 0.5 ^[11], D/D_t 是物质导数。重力方程:

$$F_g = m_p g \quad (9)$$

g 是重力加速度矢量,取 9.8 ,根据导入模型位置,沿 z 轴负方向。能量平衡方程:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_i + Q_{rad} + Q_s \quad (10)$$

Q_i 表示从连续相到颗粒的对流传热速率, Q_{rad} 表示辐射换热率, Q_s 是其它热源,模拟中不涉及热变化。

红细胞运动模拟应用 128 核并行机计算 65.7 h。红细胞分布以切片云图形式表现,颗粒轨迹为清晰显示并作稀疏化处理。由于每个颗粒具体运动情况不同,研究结果中提到的时间和速度数据,为大致满足描述情况的时间与速度。

2 结果

红细胞分布模拟中流场内红细胞体积分数呈周期变化,取第 10 个周期作为观察对象,代表性时刻对应计算结果以截取红细胞颗粒体积分数标量切片云图(图 2)表示。模拟结果(图 3)显示,血流速度骤增骤减,红细胞运动速度不能及时变化,虽然

红细胞以固定体积分数均匀添加于入口,仍出现了不同时刻下红细胞体积分数差异,又由于流场内血流情况不同,红细胞体积分数于不同位置亦有差异。7.2~7.5 s 时入口速度低且缓慢增加,真假腔内红细胞体积分数相近,假腔逐渐降低;7.5~7.7 s 时入口速度骤增,真假腔内红细胞体积分数升高,真腔提升更明显,直至 7.7 s 接近周期内红细胞含量顶峰;7.7~7.9 s 时入口速度骤减,真假腔内红细胞含量降低;8.0 s 开始下一周期。红细胞体积分数分布有规律,升主动脉内红细胞体积分数往往大于 AD 内,真腔内红细胞体积分数往往大于假腔,假腔近心端往往是红细胞体积分数最低区域。

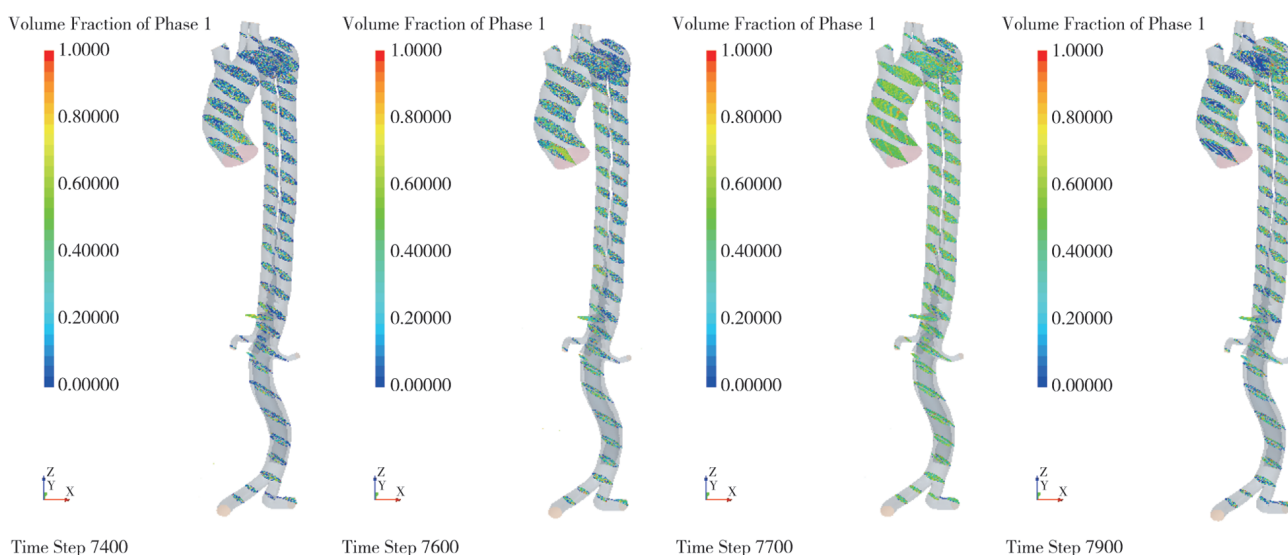


图 2 4 个时间段下红细胞体积分数切片云图

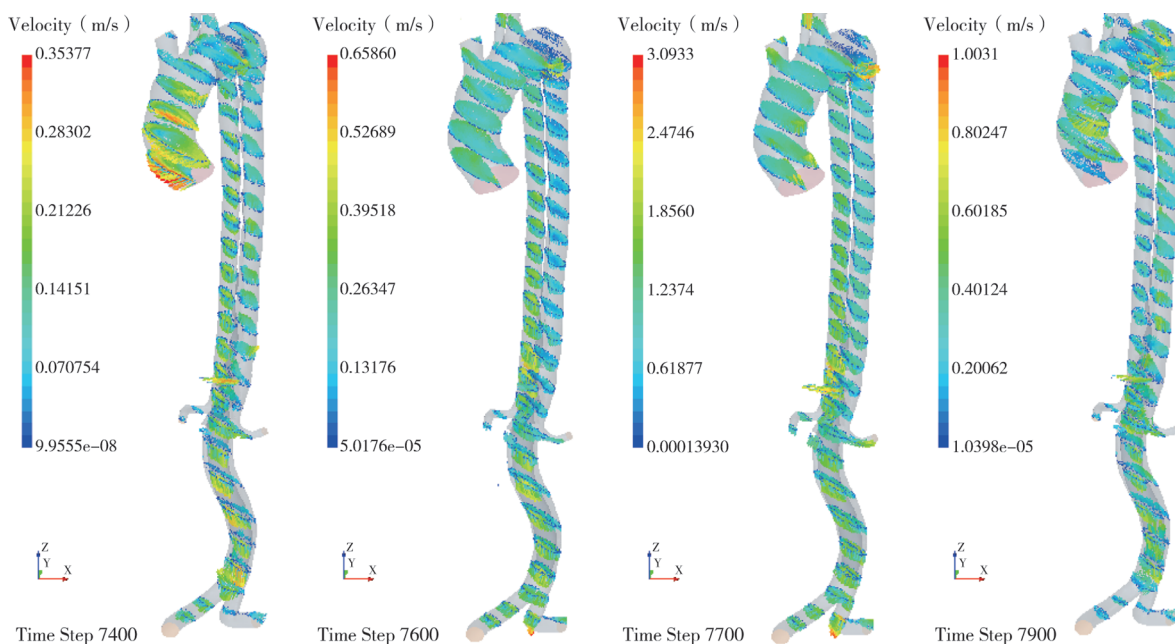


图 3 4 个时间段下血液速度切片云图

红细胞轨迹模拟时心跳周期 0.8 s, 均匀取 4 个时间点 (0.0、0.2、0.4、0.6 s), 追踪各时间点至其后 0.01 s 内进入流场的红细胞, 记录颗粒轨迹, 经后处理形成轨迹速度图 (图 4) 与轨迹时间图 (图 5), 轨迹起止时间分别为 0.0、1.6 s, 图中每条轨迹为单一颗粒运动路径, 速度图显示颗粒经过此位置时速度, 时间图显示颗粒经过此位置对应时刻。

模拟结果显示升主动脉内, 0.0、0.2、0.4 s 时进入流场的颗粒运动模式相似, 轨迹稳定, 鲜有交错, 速度逐渐增加; 0.6 s 进入流场的红细胞轨迹在 0.7 s 出现扰动, 扰动轨迹速度约 0.5 m/s, 1.2 s 后轨迹稳定。AD 内, 0.0、0.2、0.4 s 时进入流场的颗粒运动模

式相似, 红细胞一部分穿过撕裂口进入假腔, 另一部分进入真腔, 进入真腔的红细胞速度约 1.2 m/s, 轨迹稳定, 没有交错, 速度均匀, 0.7 s 行至腹动脉位置, 速度减慢, 不发生回流, 1.4 s 开始加速, 流出 AD; 进入假腔的红细胞速度在撕裂口出现轨迹最大速度 3.3 m/s, 迅速减速, 红细胞大部分向远心端流去, 小部分流向近心端; 向远心端流去的颗粒速度约 1.0 m/s, 轨迹互相缠绕, 流至胸主动脉, 出现回流, 颗粒向近心端流去, 个别轨迹穿过撕裂口进入真腔; 向近心端流去的颗粒, 其轨迹弯曲近似椭圆, 互相缠绕, 最高速度 0.3 m/s; 0.6 s 时进入流场红细胞颗粒在 AD 运动行为与上述情况相比, 速度与轨

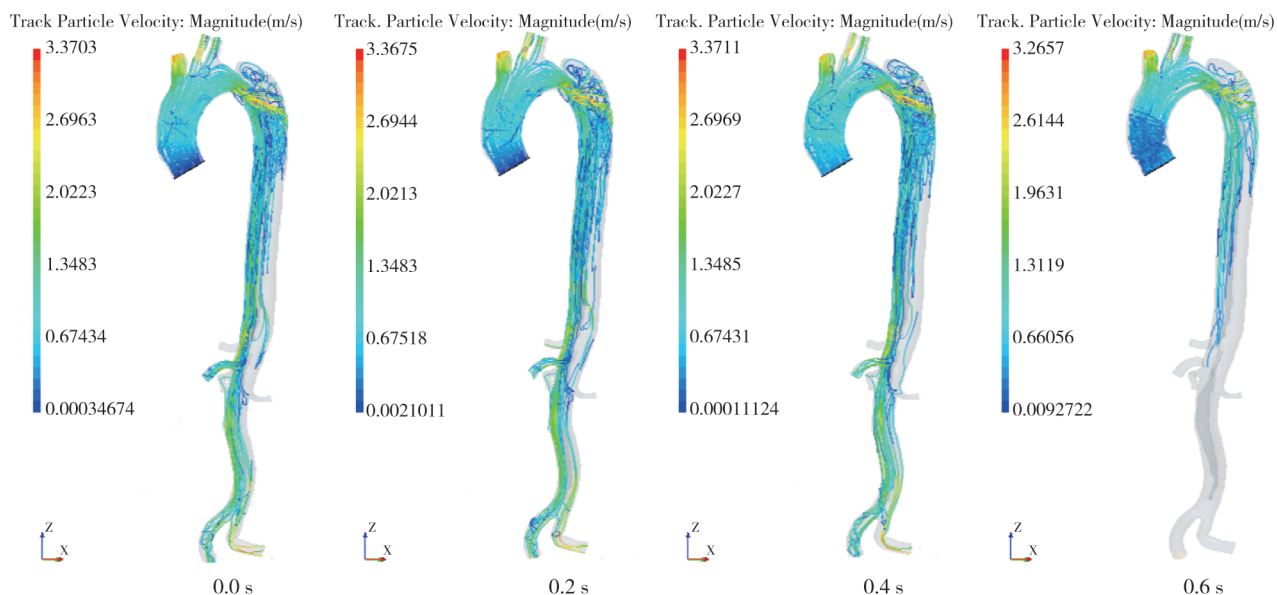


图 4 颗粒轨迹速度图

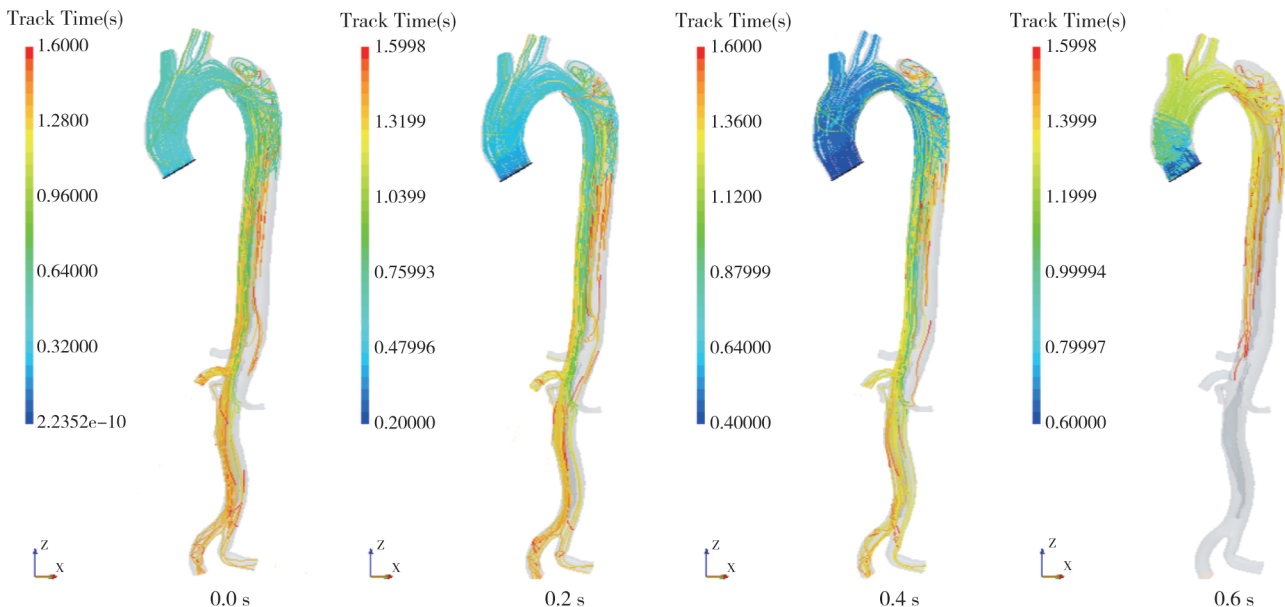


图 5 颗粒轨迹时间图

迹形状相似,时间上落后约 1 个周期。

3 讨论

本研究红细胞体积分数图显示,假腔近心端内红细胞相对少;轨迹图显示,此处缺少新鲜血液涌入;时长 0.8 s 心跳周期内,入口速度为正 0.7 s 内,大部分血液向远心端流去;在入口速度为负 0.1 s 内,少量血液由假腔远心端涌入此处。新鲜血液内含有对血管有益成分,比如血小板,可通过释放多种介质和生长因子促进血管生成^[11-12]。严重膨胀的假腔近心端与新鲜血液缺乏接触,使得血管损伤后修复功能一定程度上受削弱,一些针对性药物作用亦一定程度受影响。

假腔近心端内红细胞运动轨迹另一特征是弯曲缠绕、速度低,这直接显示血液内颗粒物质在此处低速旋转,长期停留,进而形成血栓。入口速度为正,近心端形成的血栓可向远心端流去;入口速度为负,假腔血液逆流,血栓可穿过撕裂口进入真腔。血栓附着于血管壁,可使血液通道进一步狭窄,血管进一步膨胀,甚至造成堵塞,真腔堵塞或假腔堵塞,均有可能造成假腔近心端进一步膨胀并引起破裂。

除了 AD 主动脉区域,红细胞流线比较稳定,这样的流动模式是健康的,血液输送效率较高。在假腔内,入口速度为正时颗粒轨迹出现缠绕,血液形成高速旋涡,这样的流动模式对血液运输不利,动能转化更多热量,血流也缺少指向性,很明显相同时间内真腔红细胞轨迹长于假腔。在入口速度为负时,假腔血液逆流进入真腔,真腔顺流进入假腔,形成真假腔血液循环,这样的局部循环流动模式更加阻碍了血液向正确方向运输。

本研究结论认为:①假腔近心端膨胀处缺少新鲜血液涌入,此处血管壁相比于其它部位,与血液内有益物质接触偏少,一定程度上对血管壁修复

不利;②假腔近心端膨胀处存在低速旋涡、颗粒轨迹弯曲缠绕,这样的流动模式为血栓形成创造了有利条件;③真假腔形成低速血液循环,增加了血栓黏附于血管壁概率;④假腔内血流模式输送血液能力低。

[参考文献]

- [1] 王 亮. Stanford B 型主动脉夹层计算流体力学数值模拟分析[D]. 上海: 第二军医大学, 2010.
- [2] 王 亮, 陆清声, 冯 瑞, 等. DeBakey III 型主动脉夹层血动力学数值模拟分析初步研究[J]. 介入放射学杂志, 2010, 19: 683-687.
- [3] 王文全, 闫 妍, 张承磊. DeBakey III 型胸主动脉夹层血液流动的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38: 949-954.
- [4] 张亚歌, 高 斌, 常 宇. 人工心脏吻合口位置对主动脉内微栓运动的影响[J]. 医用生物力学, 2016, 31: 199-205.
- [5] 初 博, 乔爱科. 搭桥术治疗 DeBakey III 型主动脉夹层的流固耦合数值模拟[J]. 医用生物力学, 2012, 27: 386-391.
- [6] 王 鹏, 张锡文, 范占明. 基于 CT 断层扫描的腹主动脉夹层的数值计算[J]. 工程力学, 2012, 29: 229-234.
- [7] 李 白, 李晓阳. 基于主动脉流-固双向耦合数值模拟的微循环负载影响研究[J]. 医用生物力学, 2016, 31: 426-430.
- [8] Johnston BM, Johnston PR, Corney S, et al. Non - Newtonian blood flow in human right coronary arteries: steady state simulations [J]. J Biomech, 2004, 37: 709-720.
- [9] 曾宇杰, 罗 坤, 樊建人, 等. 主动脉夹层血液两相流动数值模拟分析[J]. 工程热物理学报, 2016, 37: 780-784.
- [10] 杨金有, 俞 航, 刘 静, 等. 椎动脉狭窄内血液两相流动数值模拟分析[J]. 现代生物医学进展, 2014, 14: 3410-3413.
- [11] Gawaz M, Vogel S. Platelets in tissue repair: control of apoptosis and interactions with regenerative cells[J]. Blood, 2013, 122: 2550-2554.
- [12] Stellos K, Gnerlich S, Kraemer B, et al. Platelet interaction with progenitor cells: vascular regeneration or injury? [J]. Pharmacol Rep, 2008, 60: 101-108.

(收稿日期:2017-11-30)

(本文编辑:边 估)