

文章编号:1004-7220(2022)02-0323-06

1例Stanford B型主动脉夹层TEVAR术后新发破口的血流动力学分析

李杍燕¹, 李达¹, 樊瑜波², 袁丁³, 王家嵘³, 张颖慈⁴, 郑庭辉¹

(1.四川大学力学系,成都610065;2.北京航空航天大学医学科学与工程学院,北京100191;

3.四川大学华西医院血管外科,成都610041;4.四川文化产业职业学院,成都610213)

摘要:目的 基于血流动力学分析,探究1例B型主动脉夹层在腔内修复术(thoracic endovascular aortic repair, TEVAR)后发生新发破口的原因。**方法** 对1位B型主动脉夹层患者在TEVAR术后1、6、12、24月定期复查主动脉CT血管造影检查(computed tomography angiography, CTA)。基于各时期CTA影像,重建三维模型,进行形态学和血流动力学数值模拟分析。**结果** 相比于术后1月,术后12月真腔直径增加1.8倍,且主动脉整体扭曲度增加16.67%;术后1、6、12月,在心脏收缩期新发破口处最大血流速度分别高于支架远端锚定区平均流速69.6%、33.7%、92.1%,最大壁面剪切应力分别为平均剪切力的2.52、2.32、3.52倍;此外,最大时均壁面切应力(time-averaged wall shear stress, TAWSS)在术后1、6、12月分别为平均TAWSS的1.88、2.53、3.62倍。**结论** TEVAR术后新发破口处主动脉真腔直径存在明显突变,且持续增大。导致该处主动脉血流流速加快,内膜长期承受高壁面剪切应力,进而引起新发破口。

关键词: B型主动脉夹层;腔内修复术;数值模拟;远端新发破口;血流动力学分析

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.02.021

Hemodynamic Analysis of Redissection after Endovascular Repair for One Stanford Type B Aortic Dissection Case

LI Lingyan¹, LI Da¹, FAN Yubo², YUAN Ding³, WANG Jiarong³, ZHANG Yingci^{4*}, ZHENG Tinghui¹

(1. Department of Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Medical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Department of Vascular Surgery, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 4. Sichuan Vocational College of Cultural Industries, Chengdu 610213, China)

Abstract: Objective Based on hemodynamic analysis, to investigate the cause of distal re-entry tear in Stanford type B aortic dissection after thoracic endovascular aortic repair (TEVAR). **Methods** A patient with type B aortic dissection was reexamined regularly with computed tomography angiography (CTA) at 1st month, 6th month, 12th month and 24th month after TEVAR. Based on the CTA images in each period, three-dimensional (3D) aorta models were reconstructed to perform morphological analysis and hemodynamic simulation. **Results** Compared with the diameter at 1st month after TEVAR, the diameter of true lumen at 12 months after TEVAR increased by 1.8 times and the global distortion of aorta increased by 16.67%. At postoperative 1st, 6th and 12th month, the maximum blood velocities at the new entry tear in systole were 69.6%, 33.7% and 92.1% higher than the average

收稿日期:2021-04-06;修回日期:2021-06-09

通信作者:张颖慈,教授,E-mail: zhangyc116@163.com

ones at distal landing zone, and the maximum wall shear stresses (WSSs) were 2.52, 2.32 and 3.52 times of the average WSSs respectively. In addition, the maximum time-averaged WSS (TAWSS) at 1st, 6th and 12th month after TEVAR were 1.88, 2.53 and 3.62 times of the mean TAWSS respectively. **Conclusions** The morphology of the aorta remodeled after TEVAR, and a sudden change in the diameter of true lumen occurred at distal anchoring zone and continued to increase. As a result, the blood flow velocity in this area accelerated, and the intima was continuously exposed to high WSS, leading to the redissection.

Key words: Stanford type B aortic dissection; thoracic endovascular aortic repair (TEVAR); numerical simulation; distal re-entry tear; hemodynamic analysis

B型主动脉夹层是一种死亡率极高的心血管疾病,夹层通常起始于主动脉弓下部,由于假腔内血液的冲击,流回真腔,从而形成新的血液通路^[1-3]。胸主动脉腔内修复术(thoracic endovascular aortic repair, TEVAR)因其创伤小、疗效好、术后恢复快、低死亡率等优势是目前临床上应用最广泛的手术方式,主要通过用支架移植物封堵夹层主要近端破口,减少血流对假腔的冲击,达到恢复真腔血流、重塑主动脉的目的^[4]。

但TEVAR术后存在支架内漏、脊髓缺血、支架移位、远端支架破裂、远端新发破口等严重并发症^[5]。根据相关研究,TEVAR术后远端新破口的发生率为1.18%,远端新发破口的产生会严重影响术后恢复情况,甚至会带来生命危险^[6]。目前已有研究指出,主动脉锥度比形态学因素与新发破口的产生具有统计学意义,锥度比增大导致新发夹层风险增大,但仍需要进一步探索其力学因素^[7]。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)在对各种心血管疾病的研究中起到重要作用,在主动脉夹层病例中也获得应用^[8-9]。基于CFD分析B型主动脉夹层术后的血流动力学情况,从主动脉夹层血流速度、壁面剪切应力(wall shear stress, WSS)等方面研究术后主动脉夹层力学特征,为术后远端新发破口的产生原因提供依据^[10-12]。

目前对于支架远端内膜的破裂机制及其原因尚不明确,需要进一步研究。因此,本文针对1例患Stanford B型主动脉夹层行TEVAR术后并发远端新发破口患者的随访临床资料,探究其支架远端新发破口的形成原因,促进临床上预防以及治疗远端新发破口。

1 方法和材料

四川大学华西医院机构审查委员会已批准本

项研究,研究中所涉及的数据均做匿名处理。且由于本文为回顾性研究,无需获得患者知情同意。

1.1 病例临床信息

收集1例四川大学华西医院住院治疗的B型主动脉夹层患者临床资料,患者为47岁男性。CT血管三维重建显示其降主动脉有一破口,进行TEVAR术治疗,术中对原远端破口旷置处理。在术后1、6、12、24月进行复查,患者接受了计算机断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)复查,明确病变情况。术后12月在支架远端锚定区发现新发破口,再次进行主动脉腔内修复术,首次术后24月后随访结果显示主动脉恢复良好。

1.2 主动脉模型重建

利用Mimics 21.0软件对患者术后4个时期CT影像进行三维血管重建。在建模过程中对血管进行剪裁处理,只保留主要的血管分支。由于主动脉夹层中已经形成血栓的部分对流场分析没有影响,在建模过程中剔除已血栓化部分。建立初步模型后,在Mimics 3-matic 21.0中对3D模型进行优化和进一步光滑处理。

采用ANSYS 19.2 ICEM模块,对处理好的血管模型划分网格。所有模型网格设置为有限体积网格,最大网格设置为2.0 mm,网格节点数为320 873~357 239,网格单元数为1 185 504~1 331 169。此外,在主动脉壁设置边界层,其厚度为最小出口直径的1/10。

1.3 形态学参数测量

采用Mimics 21.0软件,对患者首次TEVAR术后1、6、12、24月CT影像及三维重建模型进行形态学数据测量。测量参数包括新发破口截面真腔直径、支架远端锚定区降主动脉真腔直径、腹腔干动

脉直径、肠系膜上动脉直径、肾动脉直径、主动脉整体扭曲度、新发破口局部扭曲度、真假腔体积(见图1)。其中,扭曲度计算式为^[13]:

$$T = 1 - d/s \quad (1)$$

式中: d 为主动脉根部至髂动脉之间直线距离; s 为中心线长度。主动脉中心线为三维模型每个截面上拟合直径的中点连线,其长度可由 Mimics 21.0 软件测得。主动脉整体扭曲度指从升主动脉到髂动脉之间的扭曲度;新发破口局部扭曲度指从主动脉弓末端到腹腔干分支动脉之间的扭曲度。

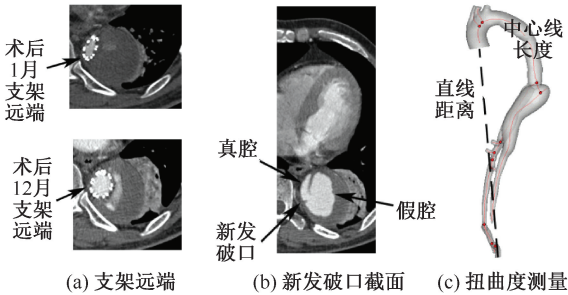


图1 动脉模型和形态学参数测量

Fig. 1 Models of the aorta and measurement of morphological parameters (a) Distal stent, (b) Section of new tear, (c) Measurement of the aortic tortuosity

1.4 血流动力学计算分析

利用 ANSYS Fluent 对网格进行有限元计算求解。已有研究指出,考虑壁面弹性的流固耦合计算结果与刚性壁面计算结果的差距仅在 5% 以内^[10-12]。因此,本文在计算过程中,假设血管壁面刚性无滑移,并将血液简化为不可压缩牛顿流体,密度为 $1\ 050\ \text{kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $3.5\ \text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

入口采用升主动脉入口速度波形^[14][见图2(a)]。以头臂干动脉、左锁骨下动脉、左颈总动脉、腹腔干动脉、肠系膜上动脉、左肾动脉、右肾动脉、髂动脉等 11 个动脉为出口[见图2(b)]。边界条件选用三单元 Windkessel 集中参数模型^[15]。通过迭代计算,120 mmHg 压力与 80 mmHg 生理压力匹配($1\ \text{mmHg}=0.133\ \text{kPa}$)。出口压力计算式为^[16]:

$$p = (R_1 + R_2)Q - R_2C \frac{dP}{dt} + R_1R_2 \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

式中: R_1 为主动脉近端阻力; R_2 为周围血管阻力; C 为主动脉壁顺应性。利用 ANSYS-Fluent CFD 软

件内部的分离求解器,对脉动流的数值模拟求解。所有模型均采用 SIMPLEC 算法,收敛残差设置为 10^{-4} 。设置心动周期为 1 s,时间步长为 10 ms。为减小初始效应影响,进行 4 个心动周期的数值模拟,并将第 4 个周期的仿真结果利用后处理软件 Tecplot 360 2019R1 进行流场以及血流动力学参数分析。

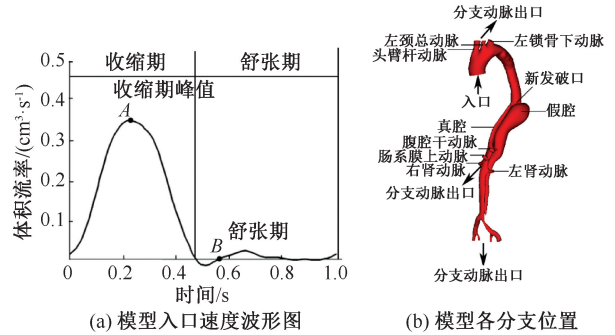


图2 边界条件设置

Fig. 2 Setting of the boundary conditions (a) Flow rate waveform at the inlet of the model, (b) Branch locations of the model

件内部的分离求解器,对脉动流的数值模拟求解。所有模型均采用 SIMPLEC 算法,收敛残差设置为 10^{-4} 。设置心动周期为 1 s,时间步长为 10 ms。为减小初始效应影响,进行 4 个心动周期的数值模拟,并将第 4 个周期的仿真结果利用后处理软件 Tecplot 360 2019R1 进行流场以及血流动力学参数分析。

计算流场速度、WSS、时均壁面剪切应力(time-averaged wall shear stress, TAWSS)进行血流动力学分析。TAWSS 计算式如下:

$$\text{TAWSS} = \frac{1}{T} \int_0^T |WSS| dt \quad (3)$$

2 结果

2.1 形态学结果

基于患者 CT 影像,对首次 TEVAR 术后 1、6、12 月(新发破口产生)以及术后 24 月的主动脉形态学参数进行测量统计(见表 1)。

在首次术后 1~6 月,新发破口截面真腔直径增大 0.81 mm,涨幅 7.1%;支架远端锚定区降主动脉真腔直径减小 0.99 mm,降幅 8.7%;腹腔干动脉、肠系膜上动脉、左肾动脉、右肾动脉 4 个分支动脉直径增大,涨幅分别为 13.69%、12.22%、3.70%、0.47%;主动脉整体扭曲度增大 0.04。在此期间,支架植入后主动脉重塑,真腔体积扩大为术后 1 月的 3.72 倍。同时,由于术中对原远端破口旷置处理,主动脉仍存在血流回流现象,致使假腔体积有所增大。

表1 主动脉形态学参数统计

Tab.1 Statistics for morphological parameters of aorta

参数	术后1月	术后6月	术后12月	术后24月
新发破口截面真腔直径/mm	11.36	12.17	20.22	21.64
支架远端锚定区降主动脉真腔直径/mm	11.36	10.37	9.86	21.64
腹腔干动脉直径/mm	5.84	6.64	6.59	10.12
肠系膜上动脉直径/mm	6.38	7.16	6.06	9.24
右肾动脉直径/mm	6.22	6.45	7.64	7.84
左肾动脉直径/mm	6.45	6.48	5.97	7.35
整体扭曲度	0.3	0.34	0.35	0.26
新发破口局部扭曲度	0.07	0.06	0.11	0.08
真腔体积/mm ³	61 450.41	228 599.20	187 672.35	321 046.46
假腔体积/mm ³	595.11	63 596.53	148 082.86	9 974.84

术后12月新发破口产生,新发破口截面真腔直径增大至约为术后1月的1.8倍,而支架远端锚定区降主动脉真腔直径减小13.2%。主动脉内膜撕裂,血液流入假腔,主动脉真腔体积减小而假腔体积急剧增大至术后6月的2.33倍。

术后24月后分支动脉直径恢复、主动脉扭曲度减小,真腔体积扩大、假腔体积减小,主动脉重塑良好。

2.2 主动脉流场分布

由图3可见:在心脏收缩期,术后4个随访时期主动脉真腔血流流动基本稳定。术后1、6、12月,在新发破口处均存在较高血流流速。术后1、6、12月支架远端锚定区平均流速分别为0.36、0.34、0.36 m/s,而新发破口处最大流速分别为0.61、0.46、0.69 m/s,新发破口处流速较平均值高出

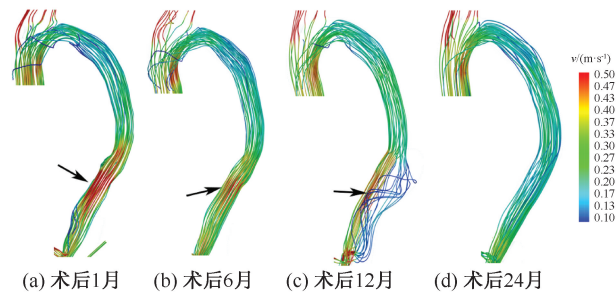


图3 术后不同时间心脏收缩期流场分布

Fig.3 Distributions of systolic flow field at different periods after TEVAR (a) At postoperative 1st month, (b) At postoperative 6th month, (c) At postoperative 12th month, (d) At postoperative 24th month

69.6%、33.7%、92.1%。术后24月(即进行第2次TEVAR术后),新发破口处流速降低至0.27 m/s。

2.3 主动脉 WSS 分布

由图4可见:在心脏收缩期和舒张期,术后1、6、12月在新发破口处均出现局部WSS较大区域。术后1、6、12月,在收缩期新发破口处最大WSS分别是支架远端锚定区平均WSS的2.52、2.32、3.52倍,而舒张期高达平均WSS的67.85、84.00、33.02倍。在术后24月,该处WSS降低至正常水平。

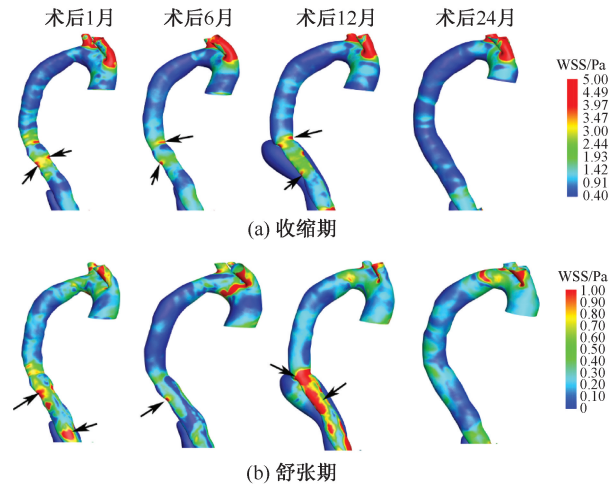


图4 术后不同时间壁面剪切应力分布

Fig.4 Distributions of wall shear stress at different periods after TEVAR (a) At systolic, (b) At diastolic

2.4 TAWSS 分布

由图5可见:术后1、6、12月在支架以下的降主动脉区域多处呈现高TAWSS。术后1、6、12月新发破口处最大TAWSS为2.34、2.14、3.02 Pa,分别是

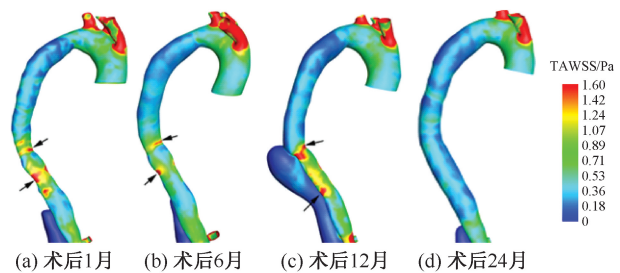


图5 术后不同时间 TAWSS 分布

Fig.5 Distributions of TAWSS at different periods after TEVAR (a) At postoperative 1st month, (b) At postoperative 6th month, (c) At postoperative 12th month, (d) At postoperative 24th month

支架远端锚定区域平均 TAWSS 的 1.88、2.53、3.62 倍。术后 24 月整体 TAWSS 降低,且新发破口处 TAWSS 恢复正常,为 0.45 Pa。

3 讨论

TEVAR 术是治疗 B 型主动脉夹层的主要手段,能有效降低患者死亡率,但同时也伴随着许多严重术后并发症。远端新发破口就是其中发生率较高的一种,会严重影响患者术后恢复,甚至会有生命危险。因此,TEVAR 术的长期安全性有待提高,仍需远期随访研究。本文对 1 例 B 型主动脉夹层 TEVAR 术后并发新发破口病例进行血流动力学分析,利用 CFD 模拟获得血流动力学参数,为 TEVAR 术后新发破口的产生原因提供血流动力学依据。

由形态学测量数据可知,在术后 1~12 月,支架段主动脉真腔重塑良好,主动脉真腔直径持续增长,而未放置支架的降主动脉真腔直径却减小,导致在支架远端锚定区即新发破口位置出现截面积突变,真腔直径突变率在术后 12 月达到 2.03。而血流动力学分析表明,TEVAR 术后新发破口血液流速增大,与术后 1 月相比,术后 12 月的最大流速增加 13.12%,且比支架远端锚定区域均值高出 92.1%。血液获得较高的流速,导致速度梯度增大,WSS 也相应增大。此外,术后 12 月最大 TAWSS 比术后 1 月高出 29.1%。

局部的高流速、高 WSS 被认为是导致主动脉新发破口的潜在因素。该病例患者首次 TEVAR 术后支架远端锚定区内膜承受高流速、高 WSS 作用,在血流长期的冲刷下,该处内膜对力学损伤的抵抗力降低,从而逐渐形成新发破口^[17]。新发破口发生后,支架远端主动脉真腔直径突跃继续增大,导致主动脉内膜所受剪切应力继续增大,夹层持续增大。同时,本文还发现,在首次 TEVAR 术后主动脉整体扭曲度以及新发破口区域扭曲度有小幅增长,这也可能是引起主动脉血流动力学参数变化的原因,是否具有直接影响仍需进一步研究。

目前已有研究表明,新发夹层患者在进行二次干预后,远期恢复效果良好。本文发现,二次 TEVAR 术封堵破口后,主动脉整体扭曲度减小,主动脉真腔体积扩大、假腔体积减小,血液流动状态

恢复正常,血液流速、WSS、TAWSS 均降低,印证了已有研究结果。

4 结论

本文对 1 例 B 型主动脉夹层 TEVAR 术后并发远端新发破口病例进行形态学分析和血流动力学数值模拟分析。结果表明,TEVAR 术支架植入后,长期随访过程中主动脉形态发生变化,支架远端锚定区真腔直径存在突变,该处主动脉血流流速快,内膜承受高 WSS,进而引起新发破口产生。因此,在 TEVAR 术中要注意支架直径的选择,可以采用限制性支架预防远端新发破口,有效减小主动脉的过度扩张,降低主动脉承受的血流 WSS,减少支架引起的血管内膜损伤。

参考文献:

- [1] CR A, SL A, MG A, et al. Risk factors for diagnostic delay in acute aortic dissection [J]. *Am J Cardiol*, 2008, 102(10): 1399-1406.
 - [2] BIRJINIUK J, TIMMINS LH, YOUNG M, et al. Pulsatile flow leads to intimal flap motion and flow reversal in an *in vitro* model of type B aortic dissection [J]. *Cardiovasc Eng Technol*, 2017, 8(3): 378-389.
 - [3] CANCHI S, GUO X, PHILLIPS M, et al. Role of re-entry tears on the dynamics of type B dissection flap [J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(1): 186-196.
 - [4] 黄金旗, 张庆贤, 陈煌, 等. 覆膜支架腔内隔绝术治疗 Stanford B 型主动脉夹层的临床疗效及术后血管重塑研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2019, 38(10): 1952-1955.
 - [5] 贺一伟, 熊盼, 张永恒, 等. TEVAR 术后支架远端主动脉夹层先兆破裂经再次 TEVAR 术救治 1 例并文献分析 [J]. *中国医药导报*, 2019, 16(21): 167-171.
 - [6] DONG Z, FU W, WANG Y, et al. Stent graft-induced new entry after endovascular repair for Stanford type B aortic dissection [J]. *J Vasc Surg*, 2010, 52(6): 1450-1457.
 - [7] JANG H, KIM MD, KIM GM, et al. Risk factors for stent graft-induced new entry after thoracic endovascular aortic repair for Stanford type B aortic dissection [J]. *J Vasc Surg*, 2017, 65(3): 676-685.
 - [8] 张薛欣, 李振锋, 许欢明, 等. 基于形态学和血流动力学的 B 型主动脉夹层病发机理分析 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(3): 271-275.
- ZHANG XH, LI ZF, XU HM, et al. Pathogenesis analysis of type-B aortic dissection based on morphological and hemodynamic parameters [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(3): 271-275.

- [9] 陈宇, 魏新, 张颖慈, 等. 基于计算流体力学的 Stanford B 型主动脉夹层血流动力学分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(6): 490-495.
CHEN Y, WEI X, ZHANG YC, *et al.* Hemodynamic analysis of stanford type B aortic dissection based on computational fluid dynamics [J]. J Med Biomech, 2018, 33(6): 490-495.
- [10] CHEN D, MULLER-ESCHNER M, KOTELIS D, *et al.* A longitudinal study of type-B aortic dissection and endovascular repair scenarios: Computational analyses [J]. Med Eng Phys, 2013, 35(9): 1321-1330.
- [11] CHENG Z, WOOD NB, GIBBS R, *et al.* Geometric and flow features of type B aortic dissection: Initial findings and comparison of medically treated and stented cases [J]. Ann Biomed Eng, 2015, 43(1): 177.
- [12] PAPATHANASOPOULOU P, ZHAO S, KOHLER U, *et al.* MRI measurement of time-resolved wall shear stress vectors in a carotid bifurcation model, and comparison with CFD predictions [J]. J Magn Reson Imaging, 2003, 17(2): 153-162.
- [13] SHIRALI AS, BISCHOFF MS, LIN HM, *et al.* Predicting the risk for acute type B aortic dissection in hypertensive patients using anatomic variables [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2013, 6(3): 349-357.
- [14] MENICHINI C, XU XY. Mathematical modeling of thrombus formation in idealized models of aortic dissection: Initial findings and potential applications [J]. J Math Biol, 2016, 73(5): 1205-1226.
- [15] PIROLA S, CHENG Z, JARRAL OA, *et al.* On the choice of outlet boundary conditions for patient-specific analysis of aortic flow using computational fluid dynamics [J]. J Biomech, 2017, 60: 15-21.
- [16] ALIMOHAMMADI M, AGU O, BALABANI S, *et al.* Development of a patient-specific simulation tool to analyse aortic dissections: Assessment of mixed patient-specific flow and pressure boundary conditions [J]. Med Eng Phys, 2014, 36(3): 275-284.
- [17] 余辉, 马依彤, 袁清华, 等. 限制性支架在预防及治疗 Stanford B 型主动脉夹层腔内修复术后远端新发破口的运用[J]. 新疆医科大学学报, 2013, 36(9): 1330-1333.