

## ·血管介入 Vascular intervention·

DeBakey Ⅲ型主动脉夹层血流动力学  
数值模拟分析初步研究

王 亮, 陆清声, 冯 睿, 王 晨, 廖明芳, 景在平

**【摘要】 目的** 探索血流动力学因素在 DeBakey Ⅲ型主动脉夹层发生、发展以及临床预后评估中的作用。**方法** 通过 CT 扫描获取临床常见典型形态的 DeBakey Ⅲ型主动脉夹层断层图像序列,重建出三维主动脉夹层血流动力学分析计算机模拟模型,采用计算流体力学数值模拟方法对主动脉夹层真假腔内的血液流动进行数值模拟分析。**结果** ①单破口型夹层假腔压强持续高于真腔压强,呈现“吹气球”效应;②当 DeBakey Ⅲ型主动脉夹层真腔受压狭窄时,真腔内压强将低于假腔内压强,夹层真腔内血流流线也会出现部分中断;③夹层撕破口附近的动脉管壁局部血流动力学因素可出现失衡现象。**结论** DeBakey Ⅲ型主动脉夹层真假腔压强失衡可导致假腔持续扩张、压迫真腔。夹层管壁局部血流动力学改变可能是慢性期 B 型夹层破裂的危险因素。

**【关键词】** 主动脉;主动脉夹层;计算流体力学;血液动力学;腔内隔绝术

中图分类号:R543.16 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2010)-09-0683-05

**The preliminary hemodynamic study of DeBakey Ⅲ aortic dissection with patient-specific geometries**

WANG Liang, LU Qing-sheng, FENG Rui, WANG Chen, LIAO Ming-fang, JING Zai-ping. Department of Vascular Surgery, Changhai Hospital, the Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

Corresponding author: JING Zai-ping, E-mail: nx.vascular@gmail.com

**【Abstract】 Objective** To discuss the effect of hemodynamic factors on the development and progresses of DeBakey Ⅲ aortic dissections, and to assess the value of these factors in predicting prognosis. **Methods** The computational fluid dynamic simulations with patient-specific DeBakey Ⅲ aortic dissection geometries were performed through the cardiac cycle. The blood flow pathlines, wall shear stress and static pressure were calculated and visualized. **Results** The pressures in the true lumen were lower than that in the false lumen if the true lumen was narrowed due to compression. The solution results indicated that there could be wall pressure and WSS imbalance on the local aortic wall in correspondence with the location of the tears, which could be a risk factor for the occurrence of aortic rupture afterwards. **Conclusion** The hemodynamic changes after the formation of DeBakey Ⅲ aortic dissection can provide additional information, which is very useful for making therapeutic decision and predicting the prognosis on a more biophysically sound basis. (J Intervent Radiol, 2010, 19: 683-687)

**【Key words】** aorta; aortic dissection; computational fluid dynamics; hemodynamics; endovascular aneurysmal repair

主动脉夹层(aortic dissection, AD)通常指主动脉腔内血液通过主动脉壁上的内膜撕裂口进入主动脉中膜外层或中外膜交界处,使主动脉壁撕裂为2层,形成真腔和假腔,并沿着主动脉纵轴延伸的一

种病理状态。AD可在短期内导致主动脉破裂致患者死亡,或由于夹层真腔被假腔压迫致狭窄甚至闭塞,由真腔供血的重要脏器(肠道、肾脏、下肢等)出现缺血性改变,引起严重的并发症<sup>[1-3]</sup>。血流动力学分析是进行主动脉扩张性疾病(主动脉瘤、AD)研究不可或缺的方面。减少主动脉管壁应力强度(wall stress),对预防和治疗AD均有重要意义。AD发生后,夹层真假腔内血液流动会发生显著改变,可造成夹层真假腔压强、动脉管壁局部血流动力学因素

基金项目:国家自然科学基金项目(30772140)

作者单位:200433 上海 第二军医大学长海医院血管外科(王亮、陆清声、冯睿、廖明芳、景在平);北京理工大学机电工程学院(王晨)

通信作者:景在平 E-mail:nx.vascular@gmail.com

发生相应的变化。探索这种变化在 AD 发生、发展中的作用,可为临床评估 AD 预后风险因素提供血流动力学依据。

采用计算流体力学分析 (computational fluid dynamics, CFD) 方法对主动脉疾病进行分析研究是流体动力学研究应用于生物医学领域的重要进展<sup>[4-7]</sup>。本研究基于患者主动脉 CT 扫描断层图像重构出具有真实解剖形态的 DeBakey III 型 AD 三维血流动力学数值模拟分析模型,初步探讨血流动力学因素在 DeBakey III 型 AD 病程中的作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 CT 图像获取

所有 DeBakey III 型 AD 断层图像信息均采自我院血管外科门诊及住院患者。64 层螺旋增强 CT (SIEMENS Inc, 德国) 扫描范围包括主动脉弓上 3 分支至双侧髂动脉之间的区域,扫描层厚为 1 mm。CT 断层图像信息以数字医学图像信息标准(digital imaging and communication in medicine, DICOM)格式保存并输出。根据夹层撕破口位置、数量以及真腔是否受压的情况,所入选的 DeBakey III 型 AD 解剖几何形态可分为以下类型。

1.1.1 单破口型夹层(AD01) 撕破口位于主动脉弓与降主动脉交界处,夹层远端无撕破口,夹层主要局限于胸主动脉段。

1.1.2 多破口真腔非受压型夹层(AD02) 近端撕破口位于降主动脉段,夹层远端真假腔内径相似,中间撕破口位于左肾动脉附近,远端撕破口位于腹主动脉分叉,肠系膜上动脉、右肾动脉、双髂动脉由真腔供血。

1.1.3 双破口真腔受压型夹层(AD03) 近端撕破口位于主动脉弓与降主动脉交界,夹层远端真腔明显受压狭窄,远端撕破口位于右髂总动脉,右肾动脉由夹层假腔供血,肠系膜上动脉、左肾动脉、左髂动脉真腔供血。

1.1.4 多破口真腔受压型夹层(AD04) 近端撕破口位于降主动脉,夹层远端真腔显著受压,夹层远端撕破口位于双侧髂总动脉,肠系膜上动脉、左肾动脉由真腔供血,右肾动脉由假腔供血。

1.2 构建 DeBakey III 型 AD 三维计算流体力学分析模型

在专业工作站内,将 AD CT 图像数据包导入医学图像处理软件 MIMICS v 12.11 (Materialise Inc, 比利时)内进行序列重建,主动脉区域进行蒙罩化

(mask)处理,设定阈值最大值(max value)3071HU,最小值(min value)-68HU。选用编辑蒙罩(edit mask)功能,去除多余蒙罩,保留升主动脉、降主动脉、双侧髂动脉、主动脉弓上 3 分支支动脉、腹腔干、肠系膜上动脉及双肾动脉均保留起始部。通过对主动脉目标区域内每个断层序列进行编辑处理,重建出 AD 三维面网格模型。选用自适应参数对面网格模型表面进行平滑化处理,去除面网格中细小且无重要解剖结构的部分,对 AD 模型全局进行网格优化处理,减少面网格模型总体网格数量,提高面网格的均一性,同时定义 AD 模型血流入口与出口平面。

将已构建成的 AD 面网格模型分别导入网格处理软件 TGrid 5.0[飞昂软件(上海)分公司,美国],采用自由网格划分的方式,设定网格增长率在 1.1 ~ 1.2,对 AD 面网格模型进行体网格划分,完成 DeBakey III 型 AD 血流动力学数值模拟分析模型的构建(表 1,图 1)。

表 1 DeBakey III 型主动脉夹层三维模型包含网格单元信息

型别	面网格单元数	体网格单元数	平均扭曲率	模型长度(mm)
AD01	137 464	1 844 181	0.28	427
AD02	122 024	1 820 501	0.26	458
AD03	126 668	1 857 030	0.27	431
AD04	138 520	1 814 914	0.28	475



图 1 DeBakey III 型主动脉夹层计算流体力学分析模型

### 1.3 边界条件设定及数值求解计算

在大动脉内,血液性质可视为牛顿液<sup>[8]</sup>,因此可用非压缩流 Navier-Stokes 方程表述血液在主动脉内的流体特性。在高级计算流体力学分析软件 FLUENT 6.3[飞昂软件(上海)分公司,美国]三维流场内进行双精度二阶求解计算。血流边界条件设定

包括血液黏性系数为 0.0035 Pas, 密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup>[8-9], 入口血流条件采用随心动周期时间变化的血液流速曲线(图 2)进行瞬态加载[9]。入口处血流平均雷诺数(Re)为 3060, Womersley 数为 23。首先以血液最大流速进行稳态加载, 使 AD 血流流场充分发展[10]。在此基础之上加载瞬态血流速-时间曲线进行数值求解。经过 4 个心动周期求解, AD 血流流动达到稳定状态, 因此求解结果在第 5 个心动周期内取值输出。

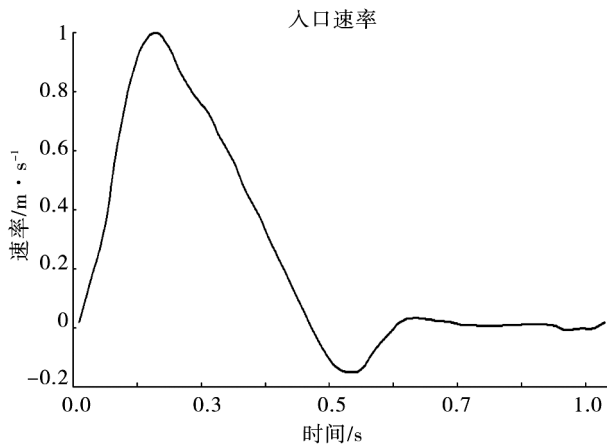


图 2 入口血液流速-时间曲线

## 2 结果

### 2.1 血压压强

DeBakey III 型 AD 真假腔血压压强云图分布如图 3 所示。分别对 4 种形态的主夹层真假腔近端(降主动脉中段)、中间部分(近内脏分支区)、远端(腹主动脉中段)壁面压强取值(表 2), 单破口型夹层(AD01)假腔壁面压强均高于真腔壁面压强。对于真腔非受压型 AD(AD02), 真腔壁面压强略高于假腔壁面压强。当夹层远端真腔出现受压狭窄时(AD03、04), 真腔壁面压强明显低于假腔壁面压强, 即在夹层两腔之间的隔膜两侧出现了压强失衡的现象。

### 2.2 血液流速流线

AD 真假腔内血液流速流线分布如图 4 所示。单破口夹层假腔内仅有少量低速血流流动, 假腔内血液趋于停滞状态。多破口真腔非受压型夹层内的血液主要在真腔内流动, 通过近端撕破口、中间撕破口流入夹层假腔。中间撕破口在血流动力学上表现为血流“入口”, 部分血流流入左肾动脉, 向左侧肾脏供血。当夹层真腔显著受压时, 血液在真腔内流动出现流动中断的现象(AD03、AD04)。血流流线的稀疏代表管腔内血流流量的大小, 因此对于真腔

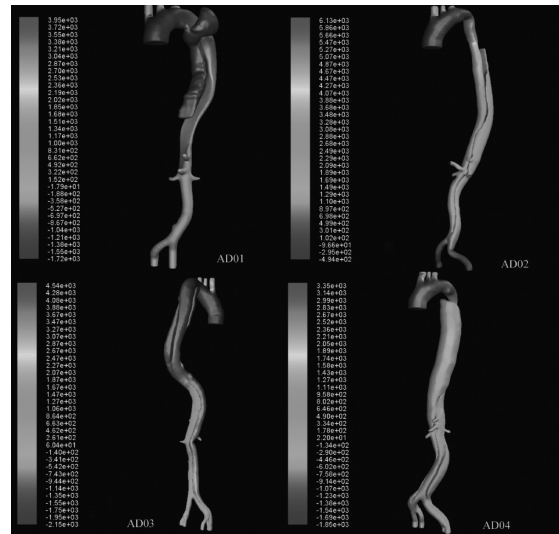


图 3 DeBakey III 型主动脉夹层真假腔压强分布云图

表 2 DeBakey III 型主动脉夹层真假腔壁面压强 (mmHg)

型别	真 腔			假 腔		
	近端	中间段	远端	近端	中间段	远端
AD01	121.5	117.7	108.4	124.9	124.9	-
AD02	125.6	120.1	114.2	116.2	114.4	112.7
AD03	131.1	111.0	102.0	128.6	124.1	116.6
AD04	111.1	99.8	103.2	110.9	109.1	106.0

受压型夹层而言, 数值求解结果表明真腔内血流流量将明显低于假腔内流量。

### 2.3 AD 管壁局部血液动力学改变

脉动血流流经夹层撕破口, 会对 AD 管壁局部形成血流冲击, 造成动脉管壁局部压强升高(图 5, 表 3), 局部壁面剪切应力(wall shear stress, WSS)也高于四周壁面。此种“冲击效应”不但会出现在近端夹层撕破口附近管腔壁面(AD02、04), 也会出现在中间段(AD02)及远端夹层撕破口(AD03)附近。



图 4 DeBakey III 型主动脉夹层真假腔内血液流速流线图



表 3 DeBakey Ⅲ型主动脉夹层局部管腔壁面间压强差值 (mmHg)

部位	最大值	最小值	压强差值
AD02近端	125.1	115.7	9.4
AD02中间段	112.2	106.7	5.5
AD03	105.3	101.0	4.3
AD04	104.1	99.7	4.4



图 5 DeBakey Ⅲ型主动脉夹层局部壁面血流动力学改变

### 3 讨论

通过 CT 扫描患者获取主动脉断层医学图像,重建仿真的 DeBakey Ⅲ型 AD 血流动力学数值模拟分析模型,并在此基础上进行 AD 血液流场计算流体力学分析,是研究主动脉疾病血流动力学简便而精确的方法。

数值模拟求解结果显示,在 DeBakey Ⅲ型 AD 真假腔内,血流动力学参数将发生显著改变。单破口型夹层假腔压强持续高于真腔压强,呈现出“吹气球”效应;当真腔显著受压时,夹层远端真腔压强会低于假腔壁面压强,即表明夹层真假两腔内血压不平衡,假腔有持续扩张并压迫真腔的趋势,可能是 AD 慢性期出现管腔瘤样扩张的原因<sup>[11]</sup>。真腔持续受压,也会引起重要脏器(肾脏、肠道、下肢)出现缺血性改变,可能引发严重的并发症。

血液流线显示 DeBakey Ⅲ型 AD 真腔内血流量虽会低于假腔,但血流流动形态主要以层流为主,假腔内血流则会出现明显的涡流,此现象与 AD 患者行主动脉多普勒彩色超声检查观测到的血流形态相一致。当血流处于低速期时,血流湍流的现象更加显著。流场内出现湍流,表明有效流量减少,血液流动动能损失增多,患者心脏做无效功增加,增加了患者的心脏负担。随着真腔受压变窄,真腔内血液流线可部分中断,表明此部分真腔内无明显血液流动,远端主要靠假腔供血。真腔内血流停滞

可能诱发血栓形成,导致真腔永久性闭塞。

血液流经撕破口后会对血管局部壁面产生冲击,造成局部壁面的压强高于四周壁面压强。血流对管壁的冲击效应不但能在夹层近端撕破口出现,也能在夹层中远端撕破口附近壁面出现。局部壁面压强升高预示此部位可能为主动脉夹层管壁上的危险区域,血流持续不断地对局部壁面形成冲击,可能导致局部管壁结构受损,强度下降,最终可能发生破裂。此现象揭示 AD 中远端撕破口也可以是造成夹层局部危险因素的原因,可能需要进一步手术治疗以降低远期 AD 患者发生并发症的风险。

对于夹层真腔稳定的 DeBakey Ⅲ型 AD 患者,目前仍主张非手术治疗,除非出现夹层进展、重要脏器缺血、主动脉瘤样扩张等严重并发症<sup>[12]</sup>。DeBakey Ⅲ型 AD 中远端撕破口是否均需手术治疗,仍存在较多争议。对 DeBakey Ⅲ型 AD 进行计算流体力学数值模拟分析,可在早期评估 AD 真腔是否稳定,局部管壁血流动力学改变则提示夹层撕破口的危险程度,为临床治疗 DeBakey Ⅲ型 AD 方案选择提供理论依据。

为提高 AD 计算流体力学数值模拟结果的精确度,本课题主要采取以下方法解决。

3.1 应用 64 排螺旋 CT 对受试者进行薄层扫描(层厚 1 mm),以获取具有高分辨率的主动脉断层图像信息。

3.2 在进行主动脉轮廓提取的过程中尽可能减少人工操作步骤的比重,以减少主动脉形态几何修复过程中出现的解剖信息丢失<sup>[13]</sup>。

3.3 对主动脉三维面网格模型进行体网格划分时,采用高密度体网格,达到解与网格无关(mesh-independent solution),即体网格数增加到一定程度之后,解不再随着网格密度改变。

3.4 求解计算方法与 Shahcheraghi 等<sup>[10]</sup>报道相类似,即首先以入口最大血流速进行定常求解,使主动脉内流场充分发展,再加载非定常求解,经过 4 个心动周期计算,主动脉流场内各血流动力学指标呈现随心动时间的周期性变化,则在第 5 个求解周期各时间点内取样。保证了求解结果的稳定性。

### [参考文献]

- [1] Auer J, Berent R, Eber B. Aortic dissection: incidence, natural history and impact of surgery[J]. J Clin Basic Cardiol, 2000, 3: 151 - 154.

- [2] Elefteriades JA. Natural history of thoracic aortic aneurysms: indications for surgery, and surgical versus nonsurgical risks[J]. Ann Thorac Surg, 2002, 74: S1877 - 1880.
- [3] Rutherford RB. Vascular Surgery[M], 6th ed. Philadelphia, ELSEVIER SAUNDERS, Inc, 2005: 1512 - 1533.
- [4] Raghavan ML, Vorp DA, Federle MP, et al. Wall stress distribution on three-dimensionally reconstructed models of human abdominal aortic aneurysm[J]. J Vasc Surg, 2000, 31: 760 - 769.
- [5] Li Z, Kleinstreuer C. Blood flow and structure interactions in a stented abdominal aortic aneurysm model [J]. Med Eng Phy, 2005, 27: 369 - 382.
- [6] Howell BA, Kim T, Cheer A, et al. Computational fluid dynamics within bifurcated abdominal aortic stent-grafts [J]. J Endovasc Ther, 2007, 14: 138 - 143.
- [7] Fung GS, Lam SK, Cheng SW, et al. On stent-graft models in thoracic aortic endovascular repair: a computational investigation of the hemodynamic factors[J]. Comput Biol Med, 2008, 38: 484 - 489.
- [8] Fung YC. Biomechanics Circulation[M]. 2nd Edition, Springer, New York, 1997: 108 - 205.
- [9] Pedley TJ. The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1980: 160 - 234.
- [10] 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: 378 - 387.
- [11] Sueyoshi E, Sakamoto I, Hayashi K, et al. Growth rate of aortic diameter in patients with type B aortic dissection during the chronic phase[J]. Circulation, 2004; 110: 11256 - 1261.
- [12] Hiratzka LF, Bakriks GL, Beckman JA, et al. Guidelines for the diagnosis and management of patients with Thoracic Aortic diseases[J]. Circulation, 2010, published online Mar 16, DOI: 10.1161/CIR.0b013e3181d4739e.
- [13] Lawford PV, Ventikos Y, Khir AW, et al. Modeling the interaction of hemodynamics and the artery wall: current status and future prospects[J]. Biomed Pharmacother 2008, 62: 530 - 535.

(收稿日期:2010-06-18)

## •病例报告 Case report•

### 外周斑块切除系统治疗髂外动脉硬化斑块一例

钱 钧, 姜 宏, 徐 钢, 杨晓红, 阎 浩, 段佩琰

【关键词】 动脉硬化; 外周斑块切除系统; 介入治疗

中图分类号:R543.5 文献标志码:D 文章编号:1008-794X(2010)-09-0687-02

**Plaque excision of external iliac artery with the Silverhawk catheter: report of one case** QIAN Jun, JIANG Hong, XU Gang, YANG Xiao-hong, YAN Hao, DUAN Pei-yan. Interventional Department of Peripheral Vascular Disease, No.463 Hospital of People's Liberation Army, Shenyang 110042, China (J Intervent Radiol, 2010, 19: 687-688)

Corresponding author: JIANG Hong, E-mail: jh463@sina.com

【Key words】 arteriosclerosis; Silver Hawk directional atherectomy device; interventional treatment

我院于 2009 年 7 月利用外周斑块切除系统(Silver Hawk™ 斑块切除系统)对 1 例髂外动脉完全硬化闭塞患者实施血管腔内硬化斑块切除术,取得成功,现报道如下。

#### 临床资料

患者男,68 岁。因左下肢间歇性跛行 2 年,加重伴左足静息痛 3 周来诊。来诊时患者左下肢慢走 20 余米即感左小腿酸痛。查体见左足皮肤温度明显低于对侧,皮色苍白,轻度发绀;左股动脉搏动消失,左足背动脉搏动未触及。左足踝肱指数 0.52。CTA 检查见左髂外动脉完全闭塞。遂利用外

周斑块切除系统对左髂外动脉病变处行腔内旋切治疗。步骤如下:右腹股沟区局麻,以 Seldinger 法穿刺右股动脉,利用“翻山”技术将 9 F“翻山鞘”(COOK)留置于左髂总动脉,其后行左下肢造影检查,进一步明确血管病变情况。用 0.035 英寸超滑泥鳅导丝通过左髂外闭塞病变进入左股动脉,再用交换技术将 0.014 英寸超硬交换导丝送过闭塞段血管,进入左股动脉流出道。将外周斑块切除系统用肝素盐水冲洗后,将 0.014 英寸导丝倒装入切割导管,该导管为快速交换型。沿导丝将切割导管头端穿过整个病变段。在路图引导下,将切割刀口对正突出斑块,缓慢匀速推送切割导管对斑块进行切割。当导管头端的收割舱装满后,取出导管并清