

文章编号: 1004-7220(2018)06-0495-05

3种可转换型腔静脉滤器血流动力学数值模拟

冯海全, 李 贲, 国 芳, 王 坤

(内蒙古工业大学 机械工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要:目的 研究不同血栓直径和血栓含量下可转换型腔静脉滤器用于治疗肺动脉栓塞后对血流动力学的影响。方法 构建3种直径相同、过滤结构(L、S和W型)不同的滤器仿真模型,利用计算流体力学方法对植入血管以后的滤器进行血流动力学分析。结果 在无血栓条件下,3种滤器均对血流有一定的阻碍作用,并使出口处的平均流速增大。其中,L型滤器引起的出口平均流速最大,S型次之,W型最小。在有血栓条件下,滤器过滤杆的结构形状对出口平均血流流速、血栓流速、血流出入口压差、血栓出入口压差影响不明显;而随着血栓直径的增大和血栓含量的增加,血流动力学因素呈现不同程度下降趋势。血流对3种滤器过滤杆上产生的壁面剪应力均在正常范围之内,而滤器支撑体下游端和支撑体与过滤杆连接处产生的壁面剪切应力都小于最小极限值,该处容易引起血栓形成。结论 利用计算流体力学方法分析3种可转换型滤器在不同过滤杆结构以及不同血栓直径、血栓含量下对血流动力学的影响,为新型滤器的设计研发提供理论参考。

关键词:可转换型腔静脉滤器;血流动力学;血流流速;压差;壁面剪应力

中图分类号: R 318.08 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.06.004

Numerical Simulation of Hemodynamics in Three Kinds of Convertible Vena Cava Filters

FENG Haiquan, LI Yun, GUO Fang, WANG Kun

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Objective To study the hemodynamic effect of the convertible vena cava filters on treating pulmonary embolism with different thrombus diameters and contents. **Methods** Three kinds of simulated filter models with the same diameter but different filtering structures (L-style, S-style and W-style) were built and then the hemodynamics of the filter after its implantation into the vessels was analyzed by using computational fluid dynamic (CFD) method. **Results** Without thrombus in the vessels, three kinds of filters in blood had some obstructive effects and increased the average outlet velocity. While the L-style filter caused the maximum average outlet velocity, the S-style filter was in the middle, and the W-style filter was the lowest. Under the condition of thrombus, the structures of the filter rods had no obvious effect on the average outlet velocity of blood flow and thrombus, and differential pressure of blood flow and thrombus between inlet and outlet. With the increase of thrombus's diameter and content, the hemodynamic factors showed varying degrees of decreasing tendency. The wall shear stresses (WSS) on three kinds of filter rods caused by blood flow were in normal ranges, and WSS on the lower end of filter supports, the joints of supports and filter rods were below the minimum value, where thrombosis was easy to occur. **Conclusions** The hemodynamic effect of three kinds of convertible vena cava filters with different filtering structures, different thrombus diameters and contents in vessels were analyzed by using CFD method, which would provide theoretical references for the design and development of novel filters.

Key words: convertible vana cana filters; hemodynamics; blood flow velocity; differential pressure; wall shear stress

收稿日期:2017-12-06; 修回日期:2018-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51565045),内蒙古工业大学科学研究项目(X201501)

通信作者:冯海全,教授,硕士研究生导师,E-mail:fhq515@163.com

目前,腔静脉滤器介入术已被公认为是预防肺动脉栓塞(pulmonary embolism, PE)最直接且最有效的手段,并在国内外广泛被应用^[1-2]。它的主要治疗意义在于腔静脉滤器能够很好过滤致命性栓子,从而防止PE的发生。

临床上所用的两种腔静脉滤器分别为永久性滤器和可回收型滤器,有关其被用于肺动脉治疗的研究已有报道^[5-6]。Richard等^[7]分析发现,“Simon”滤器捕捉后的血栓会增大血流停滞区域和回流区域,这种现象可能是引起腔静脉阻塞的原因。Johnson等^[8]等通过临床试验评估可回收型滤器——“Option”滤器治疗PE的有效性和安全性,结果表明,滤器回收成功率为100%,临床成功率为88%,故“Option”滤器具有高度的回收安全性和临床成功率。

滤器被植入人体后会产生不容忽视的并发症^[9-12]。其中,永久性滤器一经置入就不能取出,长期留在体内容易引发血栓形成和下腔静脉阻塞等现象。可回收型滤器常常无法被取出,因而回收技术有一定难度^[13-14]。因此,本文设计了一种新型可转换型腔静脉滤器,旨在改善以上两种滤器的不合理性。目前,国内外对这种滤器及血流动力学特性的研究^[15-16]还比较少。该滤器被植入之后可在一定时间内转换成支架,并永久地留在体内。

为了研究这种新型可转换型滤器的血流动力学特性,本文利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法,模拟分析过滤单元结构不同的3种可转换型滤器在腔静脉内不同血栓直径、血栓含量下对血流流速、进出口压力差和壁面剪应力的影响,比较血流动力学特性的差异,为新型可转换型腔静脉滤器的研发和临床应用提供指导。

1 模型与方法

1.1 几何模型

1.1.1 三维实体模型建立 利用实体建模软件SolidWorks 14构建不同过滤杆的可转换型滤器和理想的腔静脉血管模型。建立的3种滤器模型的过滤结构分别为L、S和W型(见图1)。滤器原始直径为32 mm,长度为54 mm,滤器支撑体宽度与厚度相等均为0.3 mm,过滤杆宽度为0.2 mm。为便于评价并对比每种滤器的血流动力学特性,对正常

血管模型也进行数值模拟计算。另外,设定所有模型的血流流动方向是从下端流向上端。

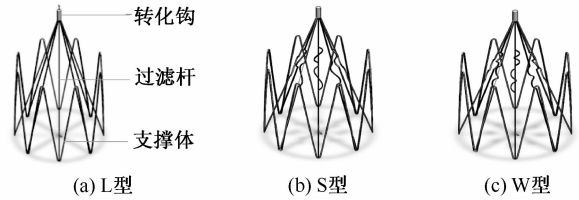


图1 滤器三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional geometric models of filters

(a) L-filter, (b) S-filter, (c) W-filter

1.1.2 网格划分 在HyperMesh 11网格划分软件中,将血管流域模型与3种滤器模型分别进行布尔运算,并划分网格得到血流动力学模型。整个模型采用非结构化四面体网格^[17-18]。

1.2 材料属性与边界条件

1.2.1 材料属性 血液是非牛顿液体,但研究表明,当模拟血液流过简单腔静脉血管模型时,以牛顿液体计算得到的速度误差值只小于10%^[19]。因此,假设血液与血栓是绝热、不可压缩的牛顿液体,其中血液的密度为 $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ^[20],动力黏度为 $3.50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ^[21];血栓的密度为 $2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,动力黏度为 $6.48 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。血管壁面与滤器壁面统一设定为无滑移条件,即壁面速度为0。

1.2.2 边界条件 血液入口速度取正常腔静脉的最大血流流速 0.140 m/s ,血栓入口速度为 74 mm/s 。出口压力设置为 0 Pa 。基于以上条件得到的最大雷诺数 $Re = 1\,356.8 (< 2 \times 10^3)$,故设定流动为层流是合理的。按上述设定条件,血液流动遵守质量和动量守恒定律,即遵守连续方程和Navier-Stokes方程。由于流动状态为低速、不可压缩,故选择基于压力的稳态求解器。多相流模型采用Eulerian模型,求解采用SIMPLE半隐式方法,离散格式均采用1阶迎风格式离散,选用默认的控制系数来求解流体的有限元方程,所有监控残差的项目遵循均小于 10^{-3} 的准则指标。

2 结果与分析

2.1 滤器对血流流速的影响

血流流速与血流量密切相关,血流量又称血流的容积速度(指单位时间内流经血管某一截面的血

量),与血流流速和血管横截面积成正比。为了评价滤器对血流流速的影响,将3种滤器的血流流速分布情况与正常血管模型进行对比(见图2)。从截面血流流速分布可以看到,每种滤器过滤杆径向方向的血流流速明显比过滤杆之间的流速小,并且最大流速都比正常血管模型的小。因此,滤器过滤杆对血流有一定的阻碍作用,容易导致有害物质停留、血栓形成等

现象。从出口血流流速分布可以看到,3种滤器模型的出口处出现了局部高速区域,其中S型滤器模型出现了风车型的高速区域,面积最大。血管模型以及L、S和W型滤器模型的出口平均流速分别为0.192、0.200、0.197、0.195 m/s。L型滤器模型的出口平均流速最大,最容易导致血管内膜受损;S型滤器次之;W型滤器最小。

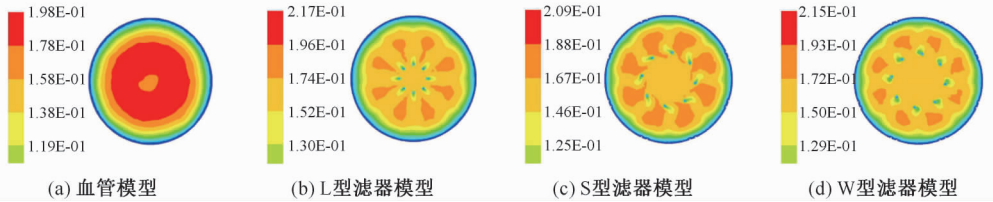


图2 截面血流流速分布

Fig.2 Blood flow velocity distribution on the cross-section (a) Vessel model, (b) L-filter model, (c) S-filter model, (d) W-filter model

2.2 血栓对血流流速的影响

出口平均血流流速大小随着血栓直径和含量的变化有着一定的变化规律。当血栓直径为一定时,3种滤器模型的出口平均流速均随着血栓含量的增加而减小,从而出口血流量也随之减少,造成局部供血不足和血栓形成等现象。血栓直径的变化对平均

流速影响不显著。血栓流速的缓慢或停滞会引起腔静脉阻塞等的现象[见图3(a)]。当血栓含量一定时,随着血栓直径的增加,出口平均血栓流速有下降趋势。血栓含量的增加也会导致出口平均血栓流速的减小,但并不明显[见图3(b)]。因此,血栓直径越大,含量越高,越易引发腔静脉阻塞的现象。

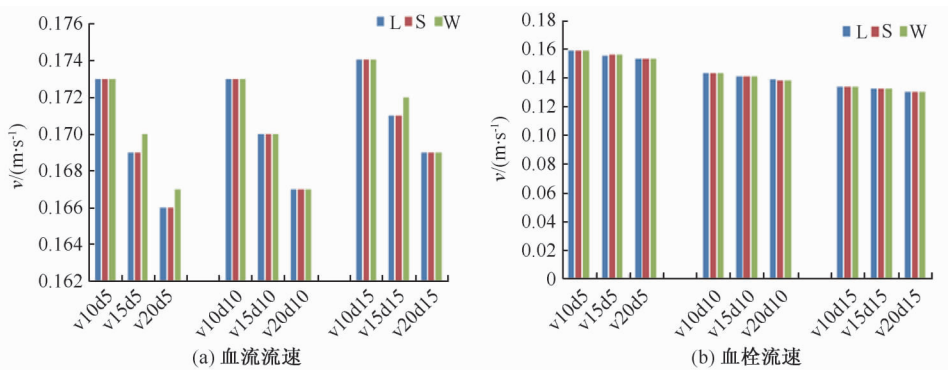


图3 不同血栓条件下3种滤器模型出口平均血流流速和血栓流速比较(v10、v15、v20代表含量10%、15%、20%血栓,d5、d10、d15代表直径5、10、15mm血栓)

Fig.3 Comparison of the average outlet velocity of blood flow and thrombus flow for three kinds of filter models (a) Velocity of blood flow, (b) Velocity of thrombus flow

2.3 血流进出口压差

血流进出口压差大小与血流经过血管时的血流阻力成反比,与血流量成正比。当血栓含量和直径一定时,3种滤器的进出口压差变化不明显。血流进出口压差随着血栓含量的增加有明显的减小趋势,说明血栓含量越多,血流阻力就越大,血流量

越少。而随着血栓直径的增加,血流进出口压差并没有明显的变化(见图4)。

2.4 血栓进出口压差

当血栓含量和直径一定时,3种滤器的血栓进出口压差变化不明显。血栓进出口压差随着血栓含量的增加有递减的趋势,但并不明显,说明血栓含量的

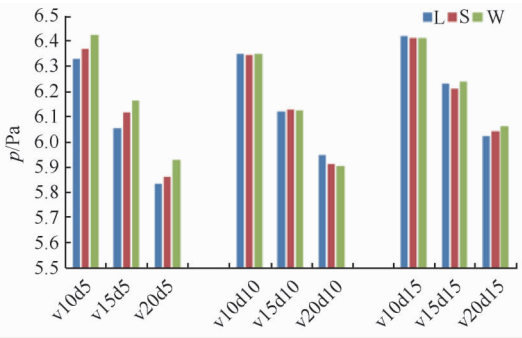


图4 不同血栓条件下3种滤器模型血流出入口压差对比(v10、v15、v20代表含量10%、15%、20%血栓,d5、d10、d15代表直径5、10、15 mm血栓)

Fig. 4 Comparison of differential pressure of blood flow between inlet and outlet of three filter models

增加对血栓流阻影响很小。而随着血栓直径的增大,血栓出入口压差明显有降低趋势,说明血栓直径越大、含量越高,血栓受到的阻力就越大(见图5)。

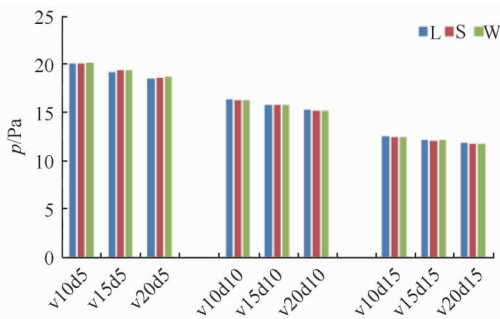


图5 不同血栓条件3种滤器的模型的血栓出入口压差(v10、v15、v20代表含量10%、15%、20%血栓,d5、d10、d15代表直径5、10、15 mm血栓)

Fig. 5 Differential pressure of thrombus between inlet and outlet of three models

2.5 血流对滤器的壁面剪应力

有研究指出,过高(>5 Pa)或过低(<0.4 Pa)的壁面切应力(wall shear stress, WSS)都会造成血栓的再次形成。图6所示为3种滤器在血栓直径5 mm、含量10%条件下的WSS分布。模型的支撑体下游端和支撑体与过滤杆连接处WSS都小于最小极限值0.4 Pa(见图6红色区域)。

3 讨论

本文通过CFD方法分析3种过滤单元结构不同的新型可转换型滤器对血流动力学的影响。研究结果显示:置入滤器的血管的出口平均血流流速

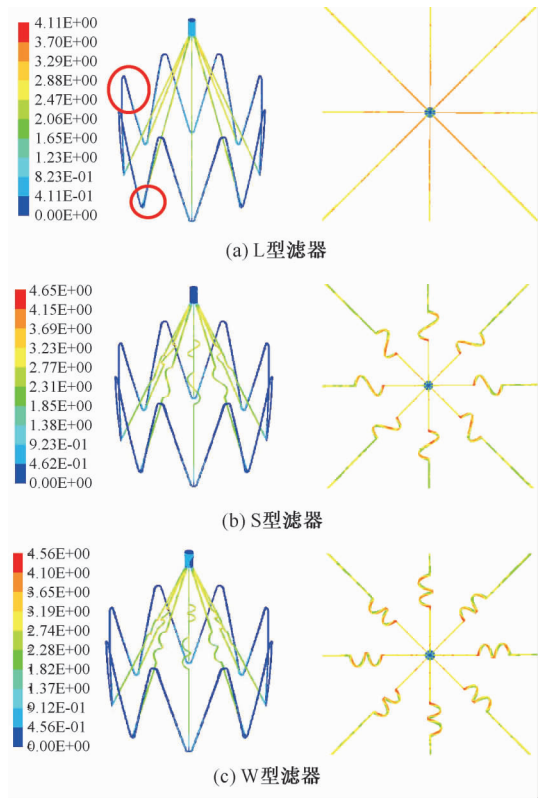


图6 滤器壁面剪应力分布(左为主视图,右为仰视图)

Fig. 6 WSS distributions on the filter wall (a) L-filter, (b) S-filter, (c) W-filter

大于正常血管的出口平均流速,且滤器过滤杆周围的血流流速明显小于其他位置的流速,说明滤器的植入易导致血管内膜的损伤,并且滤器过滤杆对血流有一定的阻碍作用。滤器过滤单元结构的改变没有使出口平均血流流速、血栓流速、血流出入口压差和血栓出入口压差产生明显的变化。3种滤器支撑体下游端和支撑体与过滤杆连接处的WSS都小于最小极限值,故此处易形成血栓。

在不同血栓含量、直径下,随着血栓含量的增加,血流出口平均流速和血流出入口压差均有明显下降趋势。而随着血栓直径的增大,血流出口平均流速和血流出入口压差没有明显的变化趋势。因此,血栓含量越多,出口血流量就越少,从而易引起下游供血不足现象。

在不同血栓含量和血栓直径下,随着血栓直径的增加,血栓出口平均流速和血栓出入口压差均有明显下降趋势。而随着血栓直径的增大,血栓出口平均流速和血栓出入口压差没有明显的变化趋势。因此,血栓直径越大,血栓受到的阻力就越大,从而

易导致血栓的再次形成。

本文选取圆筒状型的腔静脉血管作为研究对象,必然会导致不精确的计算结果。今后,需要建立更加真实的血管模型,精确模拟腔静脉滤器的血流动力学特性。

4 结语

可转换型滤器既能减少永久型滤器可能会出现并发症,也能克服可回收滤器可能损伤腔静脉内膜的缺陷。本文针对3种新型可转换型滤器的血流动力学特性分析表明,滤器的置入对血流流速、血流压差、壁面剪应力等血流动力学因素有一定的影响,从而容易引发血栓形成和血管内膜损伤等现象;血栓含量和直径的不同会造成血流动力学的改变,从而容易导致血栓再形成和腔静脉阻塞。因此,研究可转换型滤器的血流动力学特性,对新型滤器的设计与研发具有重要的理论意义。

参考文献:

- [1] 刘学飞, 尤振宇, 冯博. 可回收下腔静脉滤器的临床应用研究进展[J]. 临床军医杂志, 2014, 42(2): 198-202.
- [2] STAVROPOULOS SW, GE BH, MONDSCHIEIN JI, *et al.* Retrieval of tipembedded inferior vena cava filters by using the endobronchial forceps technique: Experience at a single institution [J]. *Radiology*, 2015, 275(3): 900-907.
- [3] SINGER MA, WANG SL, DIACHIN DP, *et al.* Design optimization of vena cava filter: An application to dual filtration devices [J]. *Biophysics*, 2010, 132(10): 1-10.
- [4] WANG SL, SINGER MA. Toward an optimal position for inferior vena cava filters computational modeling of the impact of renal vein inflow with Celect and TrapEase filters [J]. *Vasc Interv Radiol*, 2010, 21(3): 367-374.
- [5] HEIKE L, ARME A, MARTIN ZN, *et al.* Efficacy of permanent and retrievable vena cava filters: Experimental studies and evaluation of a new device [J]. *Radiology*, 2002, 25(3): 193-199.
- [6] YALLAMPALLI S, IRANI Z, KALVA SP, *et al.* Endovascular removal of a permanent "TrapEase" inferior vena cava filter [J]. *Vasc Endovascular Surg*, 2013, 47(5): 379-382.
- [7] RICHARD LL, WAYNE J, MATADIAL O, *et al.* *In vitro* hemodynamic evaluation of a simon nitinol vena cava filter: Possible explanation of IVC occlusion [J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2001, 12(5): 613-618.
- [8] JOHNSON MS, NEMCEK AA, BENENATI JF, *et al.* The safety and effectiveness of the retrievable option inferior vena cava filter: A United States prospective multicenter clinic [J]. *Radiology*, 2010, 21(7): 1173-1184.
- [9] 王小平, 肖越勇. 基于可降解材料构建的腔静脉滤器[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(12): 2133-2137.
- [10] 李建明, 贾广志, 秦孝军. 下腔静脉滤器预防肺栓塞及其并发症[J]. 介入放射学杂志, 2009, 18(12): 900-903.
- [11] CONTRACTOR S, ESMAEILI A, REINA D, *et al.* Incomplete deployment of the Vena Tech LP filter case series and concerns [J]. *Vasc Endovascular Surg*, 2011, 45(5): 345-351.
- [12] 秦定文, 施海彬, 刘圣, 等. 自制下腔静脉支架式滤器安全性的动物实验研究[J]. 介入放射学杂志, 2008, 17(5): 349-352.
- [13] DAYONG Z, JAMES S, EUNICE M, *et al.* Retrospective review of 120 celect inferior vena cava filter retrievals: Experience at a single institution [J]. *Vasc Interv Radiol*, 2012, 23(12): 1557-1563.
- [14] 曲凡勇, 李旺丽. 可回收下腔静脉滤器取出术相关并发症探讨[J]. 国际医学放射学杂志, 2016, 39(2): 120-122.
- [15] ALAIN FL, JEAN R, MICHEL B, *et al.* The optional vena tech convertible vena cava filter: Experimental study in sheep [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2012, 35(5): 1181-1187.
- [16] 冯海全, 张弢, 王永刚, 等. 一种兼容核磁共振的可转换型腔静脉滤器: 201210424745.1 [P]. 2013-02.
- [17] 国芳, 冯海全, 韩青松, 等. 3种可转换型腔静脉滤器过滤血栓效果的对比分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 261-266.
- [18] GUO F, FENG HQ, HAN QS, *et al.* Comparative analysis on thrombus filtration efficiency for three kinds of convertible vena cava filters [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(3): 261-266.
- [19] 曾堃, 乔爱科. 3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): 220-226.
- [20] ZENG K, QIAO AK. Comparative study on effects from three kinds of stents with different cross-section on aneurismal hemodynamics [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 220-226.
- [19] SASTRY SP, KIM J, SHONTZ SM, *et al.* A computational method for predicting inferior vena cava filter performance on a patient-specific basis [J]. *Biophysics*, 2014, 137(11): 1-13.
- [20] 江旭东, 滕晓艳, 史冬岩, 等. 冠脉血管支架介入耦合系统力学行为数值模拟研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 231-237.
- [21] 仇洪然, 冯海全, 王惟颢, 等. 不同支撑杆数目腔静脉滤器的生物力学性能和血流动力学分析[J]. 医用生物力学, 2015, 30(4): 304-310.
- QIU HR, FENG HQ, WANG WJ, *et al.* Analysis on biomechanical properties and hemodynamics of the vena cava filters with different numbers of support bars [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(4): 304-310.