

文章编号:1004-7220(2017)03-0261-06

### 3种可转换型腔静脉滤器过滤血栓效果的对比分析

国芳, 冯海全, 韩青松, 李治国

(内蒙古工业大学机械学院, 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的过滤血栓效果。方法

构建3种过滤单元形状(L、S和W型)的可转换型腔静脉滤器模型,利用计算流体力学方法进行血流动力学数值模拟,对比分析不同直径(5、10、15 mm)和不同含量(10%、15%、20%)血栓下的过滤效果。结果 血栓直径越大,含量越多,滤器滤杆上分布的血栓体积分数越大,滤器的过滤血栓效果越好。当血栓直径为5 mm时,与其他两种滤器相比,S型滤器的过滤效果最好;当血栓直径为10 mm时,W型滤器的过滤效果最好;而在血栓直径为15 mm时,S型滤器与W型滤器的过滤效果相同,均比L型滤器的过滤效果好。结论 滤器的植入造成了血流动力学的改变,它的过滤效果不仅与过滤单元结构有关,还与血栓含量和血栓直径大小有着密切相关。研究结果为新型可转换型腔静脉滤器的设计和临床选择提供了理论参考依据。

**关键词:** 可转换型腔静脉滤器; 血流动力学; 血栓; 体积分数; 过滤效果

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.03.009

### Comparative analysis on thrombus filtration efficiency for three kinds of convertible vena cava filters

GUO Fang, FENG Hai-quan, HAN Qing-song, LI Zhi-guo (College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract: Objective** To investigate filtration efficiency of convertible vena cava filters on treating pulmonary embolism under the condition of different thrombus diameters and contents. **Methods** Three kinds of convertible vena cava filter models with different filtering unit structures (L-style, S-style, W-style) were constructed to numerically simulate hemodynamics based on computational fluid dynamic (CFD) methods, and their filtration efficiency was comparatively analyzed under the condition of different thrombus diameters (5, 10, 15 mm) and contents (10%, 15%, 20%). **Results** With the increasing of thrombus diameter and content, the volume fraction of thrombus distributed on the filter bars increased and the filtration efficiency of the filter became better. When the thrombus diameter was 5 mm, the S-style filter's filtration efficiency was the best as compared with the other two kinds of filters. When the thrombus diameter was 10 mm, the W-style filter showed the best filtration efficiency. When the thrombus diameter was 15 mm, the S-style and W-style filter showed the same filtration efficiency, which was better than the L-style filter. **Conclusions** The implantation of vena cava filters will cause hemodynamic changes, and its filtration efficiency is not only related to filtering unit structures, but also closely related to the diameter and content of thrombus. These results provide a theoretical reference basis for the design and clinical choice of the novel convertible vena cava filter.

**Key words:** Convertible vana cava filters; Hemodynamics; Thrombus; Volume fraction; Filtration efficiency

收稿日期:2016-08-01; 修回日期:2016-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51565045, 81160186), 内蒙古自治区自然科学基金项目(2015MS0803)。

通信作者:冯海全, 教授, E-mail: fhq515@163.com。

肺动脉栓塞 (pulmonary embolism, PE) 是发病率、误诊率与病死率较高的急性心血管疾病,其主要是由下肢深静脉血栓脱落而成。目前,腔静脉滤器介入术已被公认为是预防 PE 最直接而有效的手段,并在国内外广泛被应用<sup>[14]</sup>。它的主要治疗意义在于腔静脉滤器能够很好地过滤致命性栓子,从而防止 PE 的发生。

市场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,它们被用于 PE 治疗的研究已有很多报道。Lorch 等<sup>[5]</sup>通过研究几种腔静脉滤器在不同血栓直径和血管水平或垂直方向放置条件下的过滤效果发现,血管直径较小并在垂直方向时滤器过滤效果较好,有两层或两层以上过滤结构滤器的过滤效果比锥形滤器好。Yallampalli 等<sup>[6]</sup>为了减少永久性滤器被植入后引发的长期并发症,以“TrapEase”滤器为例提出了血管内治疗方法。Richard 等<sup>[7]</sup>分析“Simon”滤器捕捉住的血栓对血流动力学的影响,结果显示,滤器捕捉后的血栓会增大血流停滞区域和回流区域,并推测这种现象可能是引起腔静脉阻塞的原因。Johnson 等<sup>[8]</sup>通过临床试验评估了可回收型滤器——“Option”滤器治疗 PE 的有效性和安全性,结果显示,滤器回收成功率为 100%,临床成功率为 88%,表明该滤器的高度回收安全性和临床成功率。

腔静脉滤器被植入人体后会产生不容忽视的并发症<sup>[9-12]</sup>。其中,永久性滤器一经置入就不能调整位置、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;而可回收型滤器留置体内的时间不长,可避免或减少长期使用的并发症。但是滤器过了回收时间窗以后,由于血管壁的内膜增生或血栓形成<sup>[13-14]</sup>,常常无法被取出,故回收有一定难度。为改善以上两种滤器的不合理性,本文旨在研究一种新型的可转换型腔静脉滤器。目前,国内外对这种滤器的研究设计还比较少<sup>[15-17]</sup>,该滤器被植入之后可以在一定时间内转换成支架,并永久地留在体内。

本文利用计算流体力学方法,对 3 种新型可转换型腔静脉滤器在不同血栓含量和血栓直径下进行血流动力学数值模拟,分析比较它们的过滤血栓效果,为新型可转换型腔静脉滤器的模拟分析与优化提供帮助。

## 1 模型与方法

### 1.1 几何模型

**1.1.1 三维实体模型的建立** 利用实体建模软件 SolidWorks 构建不同过滤单元结构的可转换型滤器和理想的腔静脉血管模型。建立的 3 种滤器模型的过滤单元结构分别为 L、S 和 W 型(见图 1)。滤器原始尺寸按照参考文献<sup>[16,17]</sup>中的滤器作为仿真依据,其直径为 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。

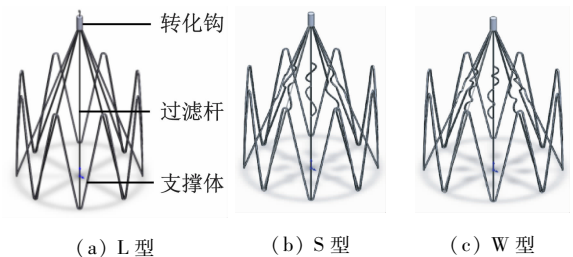


图 1 3 种滤器模型

Fig. 1 Three kinds of filter (a) L-style, (b) S-style, (c) W-style

**1.1.2 网格划分** 流体区域网格划分的好坏对计算流体力学计算结果会产生较大影响。在 HyperMesh 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,并对它们划分网格,得到血流动力学模型。整个模型采用非结构化四面体网格<sup>[18]</sup>(见图 2)。最终利用 Fluent 软件对模型进行血流动力学数值模拟。

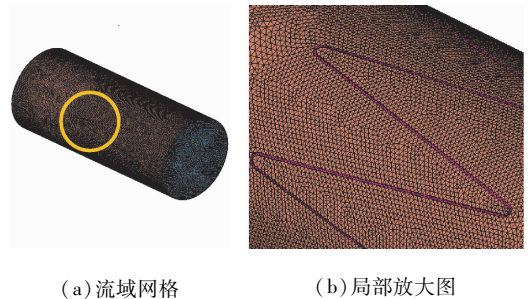


图 2 四面体网格模型

Fig. 2 Tetrahedron grid model (a) Grid of watershed, (b) Partial enlarged detail

### 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%<sup>[19]</sup>。因此,假设血液与血栓是绝热、不可压缩的牛顿液体,其中血液密度为1 060 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度为3.50 mPa·s<sup>[20]</sup>;血栓密度为2 000 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度为6.48 mPa·s<sup>[21]</sup>。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最大血流流速0.14 m/s,血栓入口速度为74 mm/s。出口压力设置为0 Pa<sup>[22]</sup>。基于以上条件得到的最大雷诺数为1 187.2 (<2 000),故设定流动为层流是合理的。

## 2 结果与分析

通过滤杆上的血栓体积分数来评价滤器过滤效果的好坏,比较3种滤器在血栓直径和含量不同的条件下对血栓的过滤效果。

### 2.1 血栓直径对滤器过滤效果的影响

在不同血栓直径(5、10、15 mm)、血栓含量为10%的条件下,L型滤器上的血栓分布情况如图3所示。在每种条件下,滤器转化钩周围聚集了大量的血栓,体积分数达到了95%,这种现象容易导致转化失败。在滤器支撑体和血管壁面接触区域和支撑体上方的血管壁面上也聚集了大量的血栓,这种现象易引发腔静脉阻塞。随着血栓直径的增大,滤器滤杆上的血栓越来越均匀地分布在其上。其中,血栓直径为5 mm时,滤杆下游端和上游端的最大血栓体积分数分别为40%和0%。当直径为10 mm时,滤杆下游端的体积分数达到了40%,在上游端的两个滤杆上只有10%,其他滤杆上却达到了30%;同时,在转化钩周围的体积分数达到了100%,在支撑体上方的血管壁上出现了圆环形的血栓黏附现象。当直径为15 mm时,血栓均匀地分布在滤杆上,下游端和上游端的最大体积分数分别为50%和40%,在血管壁面上的圆环现象消失了。从以上分析可知,随着血栓直径的增大,分布在滤器滤杆的血栓体积分数随之增加。因此,血栓直径越大,滤器的过滤效果越好。

### 2.2 血栓含量对滤器过滤效果的影响

在不同血栓含量(10%、15%、20%)、血栓直径为10 mm的条件下,L型滤器上的血栓分布情况如

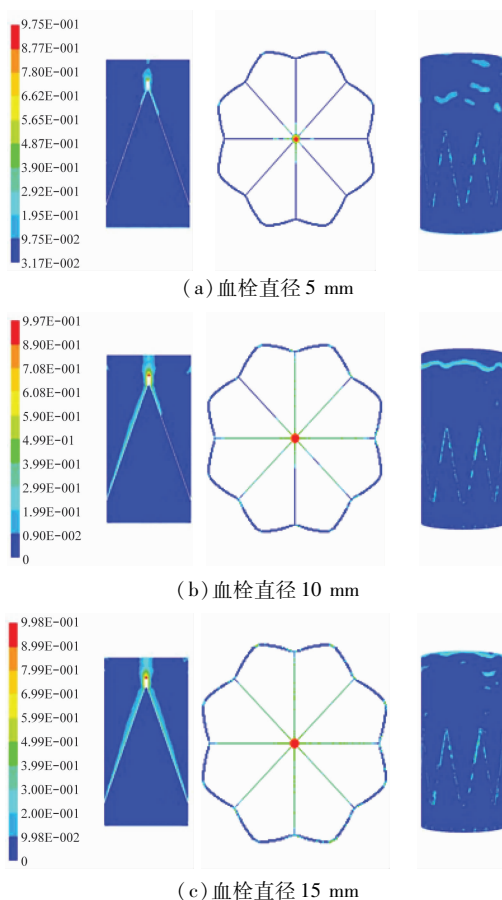


图3 不同直径血栓在L型滤器上的体积分数  
 Fig. 3 Volume fraction of thrombus with different diameters on L-type filter (a) 5-mm diameter thrombus, (b) 10-mm diameter thrombus, (c) 15-mm diameter thrombus

图4所示。当血栓含量为10%和15%时,滤杆下游端的最大体积分数均为40%,上游端的少数滤杆上分别只有0%和10%,其他滤杆上均达到了30%。当血栓含量为20%时,滤杆下游端的体积分数为50%,上游端的两个滤杆上达到了20%,其他滤杆上达到了30%。从以上分析可知,随着血栓含量的增加,分布在滤器滤杆的血栓体积分数随之增加,在支撑体和血管壁面上的血栓粘附面积也随之增大。因此,血栓含量越多,滤器的过滤效果越好,同时也容易造成腔静脉阻塞现象。

### 2.3 滤器结构对过滤效果的影响

每种滤器的过滤血栓效果根据血栓直径的不同而改变。在不同血栓直径(5、10、15 mm)、血栓含量为15%的条件下,每种滤器上的血栓(L、S、W型)最大体积分数如表1所示。

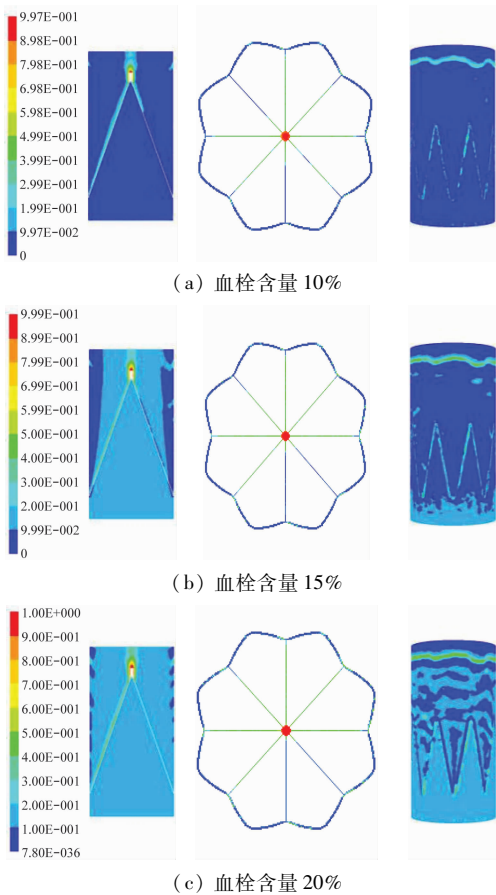


图4 不同含量血栓在L型滤器上的分布云图

Fig. 4 Distribution of thrombus with different content on L-style filter (a) 10% content thrombus, (b) 15% content thrombus, (c) 20% content thrombus

表1 3种滤器上的血栓最大体积分数

Tab. 1 The maximum volume fraction of thrombus on three kinds of filters

血栓直径/mm		最大体积分数/%	
		滤器下游端	滤器上游端
5	L型	30	0
	S型	30	20
	W型	10	20
10	L型	40	30或10
	S型	40或0	30
	W型	40	40
15	L型	40	30
	S型	40	40
	W型	40	40

3种滤器上的血栓分布情况如图5所示。血栓直径为5 mm时,S型滤器滤杆下游端的最大血栓体

积分数与L型滤器相同,且都在两个滤杆上达到了最大值,均为30%。在滤杆的S型结构上的体积分数达到了20%,远远大于L型滤器滤杆上游端的体积分数。W型滤器滤杆下游端的体积分数为10%,且均匀地分布在其上。在滤杆W型结构上血栓分布情况与S型滤器相似,最大体积分数达到了20%。从以上对比分析可知,S型滤器的过滤效果最好。

血栓直径为10 mm时,L型滤器滤杆下游端的最大血栓体积分数为40%,上游端的两个滤杆上只有10%,其他6个滤杆上均为30%。S型滤器的大多数滤杆下游端上出现了较低的体积分数,只有在1个滤杆上达到了最大值40%。这种现象会降低滤器的过滤效果。S型结构的最大值达到了30%。W型滤器滤杆下游端血栓均匀地分布在其上,最大体积分数为40%。W型结构上的最大值达到了40%。从以上对比分析可知,W型滤器的过滤效果最好。

血栓直径为15 mm时,血栓均匀地分布在3种滤器的滤杆下游端,最大体积分数均达到了40%。血栓均为地分布在S和W型结构上,最大体积分数均为40%,并且大于L型滤器上游端的体积分数。因此,W型滤器的过滤效果与S型相同,均比L型滤器好。

### 3 讨论

滤器治疗PE的主要作用是过滤腔静中的脉致命性栓子,从而防止血栓脱落到肺动脉。在不同直径和不同含量血栓下,滤器的过滤效果不同。直线型(L型滤器)可转换型滤器过滤血栓的主要位置在于滤杆下游端处。为了提高过滤能力,本文在直线型滤杆的上游端设计了S和W型结构,分析它们在不同直径和含量血栓下的过滤效果,并与直线型滤器进行对比。计算结果显示:

(1) 血栓直径对滤器过滤效果有一定的影响。随着血栓直径的增大,滤器滤杆上的血栓越来越均匀地分布在其上,体积分数也随之增大。因此,血栓直径越大,滤器的过滤效果越好。

(2) 血栓含量对滤器过滤效果也有一定的影

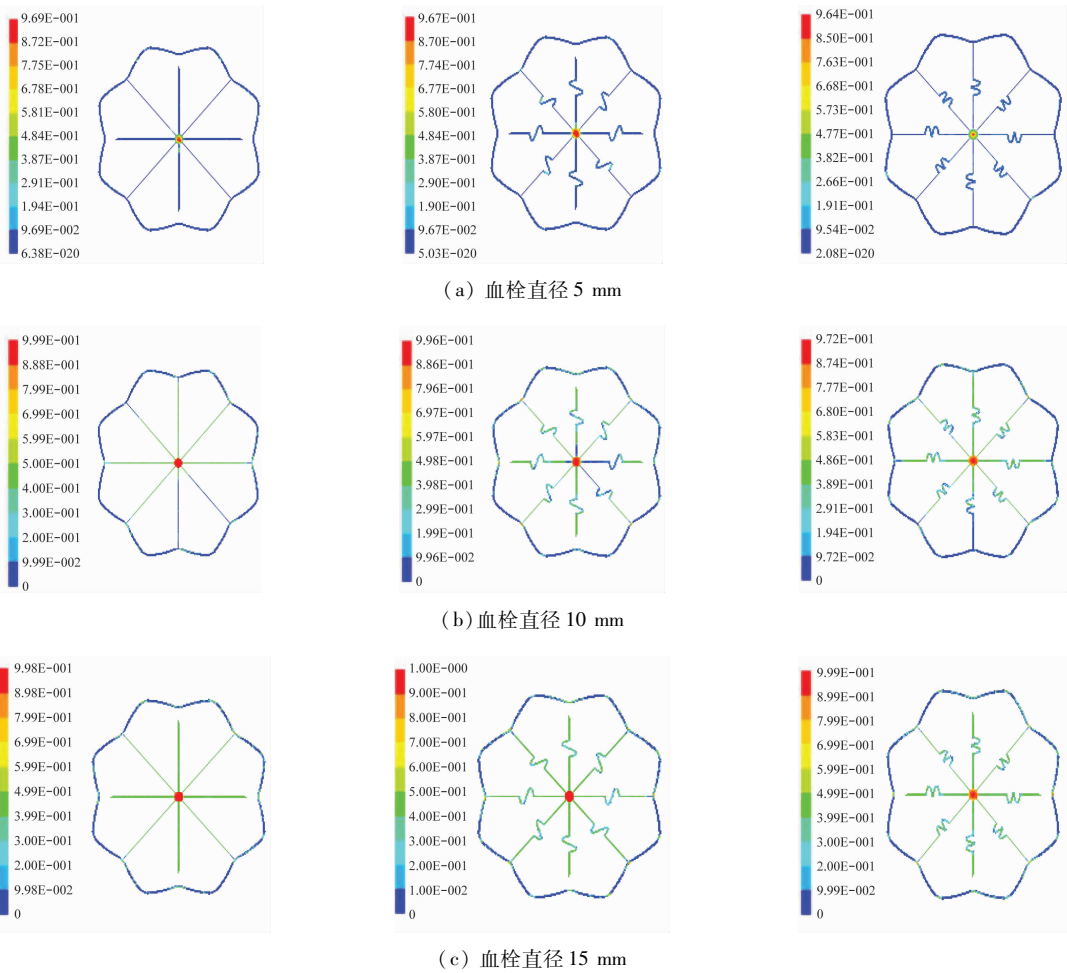


图5 3种滤器的血栓分布云图

Fig.5 Distribution of thrombus on three kinds of filter (a) 5-mm diameter thrombus, (b) 10-mm diameter thrombus, (c) 15-mm diameter thrombus

响。随着血栓含量的增加,滤器滤杆的血栓体积分数随之增大,并且在支撑体和血管壁面上的血栓黏附面积也随之增大。因此,血栓含量越多,滤器的过滤效果越好,越容易造成腔静脉阻塞现象。

(3) 改变滤器的过滤杆结构,能达到更好的过滤效果。当血栓直径为 5 mm 时,与其他两种滤器相比,S 型滤器的过滤效果最好;当血栓直径为 10 mm 时,W 型滤器的过滤效果最好;而当血栓直径为 15 mm 时,S 与 W 型滤器的过滤效果基本相同,都比 L 型滤器的过滤效果好。

滤器转化钩周围聚集了大量血栓,容易造成滤器的转化失败。在滤器支撑体和血管壁面接触区域和支撑体上方血管壁面上也聚集了大量血栓,易引发腔静脉阻塞。

本文建立的腔静脉血管模型为理想模型,不能

涵盖复杂腔静脉形状等特殊构型;材料属性及边界条件为典型值,不适用于全部临床病例。为了使数值模拟更加接近于真实情况,可以采用图像重建技术建立更加准确的个性化血管模型,有助于滤器的临床选择与使用。

#### 4 结语

本文通过流体力学数值模拟发现,滤器的植入造成了血流动力学的改变,它的过滤效果不仅与过滤单元结构有关,还与血栓含量和血栓直径大小密切相关。因此,通过不同的血栓含量与直径大小来选择滤器结构至关重要。通过本文研究结果可以更清楚地了解不同可转换型腔静脉滤器在不同条件下的过滤效果,为以后新型滤器的设计、临床选择和肺动脉阻塞介入治疗手术的规划提供帮助。

## 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, MONDSCHHEIN JI, *et al.* Retrieval of tip-embedded 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]. *J Biomech Eng*, 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]. *J Vasc Interv Radiol*, 2010, 21(3): 367-374.
- [5] LORCH H, DALLMANN A, ZWAAN M, *et al.* Efficacy of permanent and retrievable vena cava filters; Experimental studies and evaluation of a new device [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2002, 25(3): 193-199.
- [6] YALLAMPALLI S, IRANI Z, KALVA SP, *et al.* Endovascular removal of a permanent "trap Ease" inferior vena cava filter [J]. *Vasc Endovascular Surg*, 2013, 47(5): 379-382.
- [7] LEASK RL, JOHNSTON KW, OJHA M. *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 JR, BENENATI JF, *et al.* The safety and effectiveness of the retrievable option inferior vena cava filter: A United States prospective multi center clinical study [J]. *J Vasc Interv Radiol*, 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(4): 345-351.
- [12] 刘圣, 秦定文, 施海彬, 等. 自制腔静脉支架式滤器的实验研究[C]//第八届中国介入放射学大会论文集. 北京: [s. n.], 2008: 367-369.
- [13] ZHOU D, SPAIN J, MOON E, *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] LE BLANCHE AF, RICCO JB, BONNEAU M, *et al.* The optional VenaTech(TM) Convertible(TM) 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. 一种兼容核磁检查的可转换型腔静脉滤器:中国, 201210424745.1[P]. 2013-02-27.
- [17] 冯海全, 张弢, 王永刚, 等. 一种兼容核磁检查的可转换型腔静脉滤器:中国, 201220564114.5[P]. 2013-04-17.
- [18] 付文字, 乔爱科. 5种支架对颈内动脉瘤血液动力学影响的数值研究[J]. 医用生物力学, 2010, 25(5): 344-351.
- FU WY, QIAO AK. Numerical research of hemodynamic effects on internal carotid aneurysm with five types of stents [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(5): 344-351.
- [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]. *J Biomech Eng*, 2014, 137(11): 1-13.
- [20] 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 WH, *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.
- [21] 严碧歌. 血栓形成过程与其密度的相关性研究[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2006, 36(3): 356-359.
- [22] 张站柱, 乔爱科, 付文字. 不同连接筋结构的支架治疗椎动脉狭窄的血流动力学数值模拟[J]. 医用生物力学, 2013, 28(2): 148-153.
- ZHANG ZZ, QIAO AK, FU WY. Hemodynamic simulation of vertebral artery stenosis treated by stents with different links [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(2): 148-153.