

·实验研究 Experimental research·

血管内支架构型变化对血流动力学及
支架内再狭窄形成的影响

吴 瑕, 徐 克, 肖 亮, 张曦彤, 苏红英, 冯 博

【摘要】 目的 研究血管内支架的构型变化对血管壁面剪切力、血流速度及流动方式的作用,探讨支架构型对于支架内再狭窄形成的影响。**方法** 应用三维实体建模软件 Pro/engineer wildfire3.0 建立 5 种支架模型,其中 A 为对照组,B 加入横向连接结构,C 加入纵向连接结构,D 的支架厚度为 A 的 2 倍,E 的网格密度为 A 的 2 倍,将其导入计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)软件 Ansys11.0-CFX,建立流体模型。设定边界条件后进行计算流体动力学分析,比较不同构型的支架植入后引起的血管壁面剪切力、管腔内血流速度及流动方式的变化。**结果** 支架模型 A、B、C、D、E 植入后血管壁面低剪切力区域所占比率分别为:7.78%、6.65%、1.48%、16.52%、12.12%,D、E 的低剪切力区域比率明显大于 A,B 的低剪切力区域比率明显小于 A。支架横截面流速矢量(velocity vector)图显示,D、E 中的血流低流速涡流区明显大于 A,C 中低流速涡流区明显小于 A。**结论** 支架构型变化能够引起植入血管血流动力学的明显改变,支架厚度和(或)网格密度增加是引起低剪切力区形成的主要因素,能够促进支架内再狭窄的发生,在支架中加入纵向连接结构能明显减少低剪切力区,可以降低再狭窄形成概率。

【关键词】 支架;血流动力学;再狭窄;计算流体动力学

中图分类号:R543 文献标志码:B 文章编号:1008-794X(2009)-04-0297-04

The effect of stent structure changes on the hemodynamics and the formation of in-stent restenosis
WU Xia, XU Ke, XIAO Liang, ZHANG Xi-tong, SU Hong-ying, FENG Bo. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital, China Medical University, Shenyang 110001, China

【Abstract】 Objective To investigate the effect of stent structure changes on the formation of in-stent restenosis by studying the influence of these changes on the shear force to the vascular wall, on the velocity of flow and on the flow pattern. **Methods** Five stent models were established by using Pro/engineer wildfire 3.0. Model A was regarded as control structure. On the base structure of model A, transverse link component was added to form model B, and vertical link component was added to form model C. The thickness of model D was twice than that of model A, and the meshes density of model E was twice than that of model A. Fluid models were built up by importing these stent models into computational fluid dynamics (CFD) software ansys11.0-CFX, then, CFD analysis was proceeded to study the effect of stent structure on hemodynamics. **Results** After the stents were implanted, the percentage of low wall shear stress on the surface of model A, B, C, D and E was 7.78%, 6.65%, 1.48%, 16.52% and 12.12%, respectively. The percentage of D and E was obviously larger than that of A, while the percentage of B was markedly smaller than that of A. The velocity vector on the cross-sectional planes showed that the low velocity and eddy areas in D and E were much larger than that in A, while this area in C was smaller than that in A. **Conclusion** The stent structure changes can cause obvious changes in hemodynamics in the implanted vessels. The increase in the thickness and meshes density of the stent is the main factor that induces the formation of low wall shear stress, which will precipitate the development of in-stent restenosis. The added vertical link component will reduce the area of low wall shear stress as well as the occurrence of in-stent restenosis. (J Intervent Radiol, 2009, 18: 297-300)

【Key words】 stent; hemodynamics; restenosis; computational fluid dynamics

基金项目:国家科技支撑计划课题(编号:2007BAI05B04)

作者单位:110001 沈阳 中国医科大学附属第一医院放射科

通信作者:徐 克

随着血管内介入技术的蓬勃发展,已有越来越多种类的血管内支架应用于临床工作。大量实验及临床经验证实,不同构型设计的支架在支撑力、柔韧度及术后支架内再狭窄率等方面都存在较大差异。已有研究表明,支架植入能够改变支架附近的血流动力学环境,特别是血管壁面低剪切力区和低流速涡流区域的形成能够诱发血栓形成、影响内膜修复及促进急性炎症反应形成,促进支架内再狭窄^[1,2]。因此在保证支架物理特性能够满足临床需要的基础上,尽可能减少由于支架植入所引起的血流动力学改变。Frank 等^[3]研究认为,计算流体动力学(CFD)软件分析能够准确有效地模拟支架内血流情况,对分析支架内血流动力学变化有重要的指导意义。本研究旨在应用 CFD 软件模拟不同构型支架植入后血流动力学发生的变化,分析支架厚度、横向、纵向连接结构及网格密度等支架几何构型因素与血流动力学改变及支架内再狭窄的关系,以期对支架的优化设计与选用有所帮助。

1 材料与方法

1.1 建立支架模型

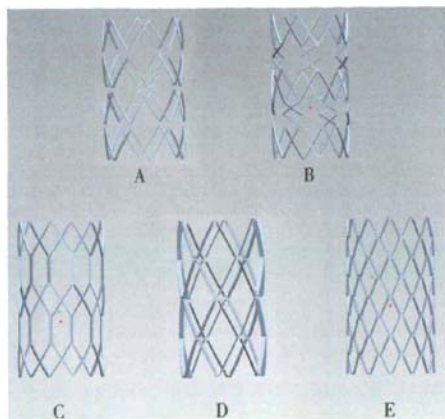
应用实体建模软件 Pro/engineer wildfire 3.0 建立 5 种不同的支架模型。模型 A 为对照组,直径为 10 mm,长度为 16 mm,支架厚度为 0.5 mm,由 4 个长度为 4 mm 的支架环组成,每个支架环包括 6 个“V”型结构单元,两两相对形成菱形网格(图 1a)。模型 B 在 2 个支架环之间引入了横向“V”型连接结构,支架的直径、长度及厚度与 A 一致(图 1b)。模型 C 在 2 个支架环之间引入了纵向连接结构,余参数与 A 一致(图 1c)。模型 D 的支架厚度为 1 mm,为 A 的 2 倍,余参数与 A 一致(图 1d)。模型 E 每个支架环包括 12 个“V”型结构单元,其网格密度为 A 的 2 倍,余参数与 A 一致(图 1e)。

1.2 将支架模型导入计算流体力学分析软件 Ansys11.0-CFX,进行边界条件的设定

根据 Choi 等^[4]研究,血液为不可压缩的牛顿流体,密度为 $1\,060\text{ kg/m}^3$,运动黏性系数为 $\mu = 3.5 \times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。边界条件设定如下。

1.2.1 入口条件 根据文献^[5,6],假设血流速度按正弦规律变化,其最大值取人体相应管径动脉血流速度的平均值 $V = 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,取人正常状态下心动频率为 1 Hz,人体动脉的平均雷诺数为 $Re = 2VR/\mu = 500$ 。

1.2.2 出口条件 设定出口的流动已经稳定,设置



A 为对照组,B 加入横向连接结构,C 加入纵向连接结构,D 支架厚度为 A 的 2 倍,E 网格密度为 A 的 2 倍

图 1 Pro/engineer wildfire 3.0 构建的 5 种支架模型

出口压力为零^[4]。

1.2.3 壁面条件 管壁满足无滑移条件(no slip),根据文献,血管壁的径向速度很小,对流场分布基本无影响,故设定壁面的径向速度为零^[6]。

1.3 计算与分析

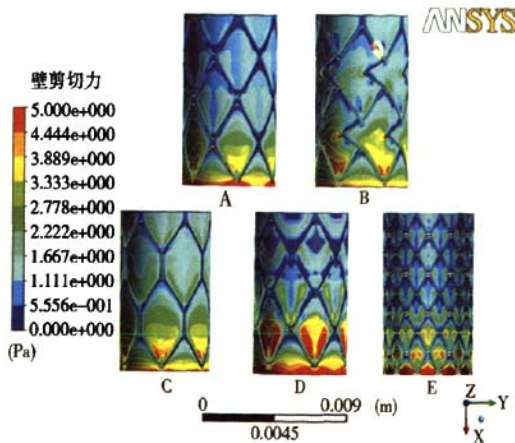
应用 Ansys11.0-CFX 进行计算流体力学分析,导出结果文件,应用 CFX 的后处理模块对结果文件进行分析。

2 结果

在上述边界条件下,各支架模型植入后血液对血管壁的剪切力分布如图 2 所示,5 种支架模型中无支架覆盖部位的剪切力基本相同,为 $1 \sim 5\text{ Pa}$ ($1\text{ Pa} = 10\text{ dyne/cm}^2$),人体正常生理状态下动脉系统的剪切力范围为 $10 \sim 70\text{ dyne/cm}^2$,本试验结果在该范围内。5 种支架模型 A、B、C、D、E 的管壁上不同剪切力区域所占比率如表 1 所示,其中低剪切力区(深蓝色区域,剪切力范围 $0 \sim 0.56\text{ Pa}$)占整个模型表面的比率分别为:7.78%、6.65%、1.48%、16.52%、12.12%,D、E 明显大于对照组 A,C 明显小于 A。图 3 为 5 种支架模型内相同位置横截面上的流速矢量图,血流速度变化范围为 0 m/s (蓝色)到 0.8 m/s (红色),可见血流低流速涡流区(蓝绿色区域)均位于支架杆侧面,D、E 中的血流低流速涡流区明显大于 A、C 明显小于 A。

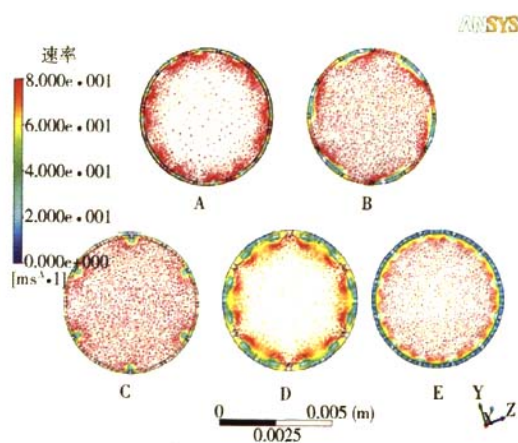
3 讨论

支架植入后血流动力学环境的改变对于支架内再狭窄形成具有重要意义,其中低剪切力区的形成是导致血栓形成、急性炎症反应及延缓内膜修复



图中深蓝色为低剪切力区，占整个模型表面的比率分别为：7.78%、6.65%、1.48%、16.52%、12.12%

图 2 5 种支架模型植入后血管壁面低剪切力区分布情况



可见血流低流速涡流区(蓝绿色区域)均位于支架杆侧面,D、E中的血流低流速涡流区明显大于A,C明显小于A

图 3 5 种支架模型植入后同一血管横截面速度矢量图

表 1 5 种模型管壁剪切力分布面积比率 (%)

剪切力区域(Pa)	模型A	模型B	模型C	模型D	模型E
0.00 ~ 0.56	7.78	6.65	1.48	16.52	12.12
0.56 ~ 3.33	87.23	91.07	96.47	71.46	79.88
3.33 ~ 5.00	4.99	2.28	2.05	12.02	8.00

的重要因素。血管内壁低剪切力区域的形成破坏了正常血液流动的层流状态,致使血细胞驱轴性流动特性消失而向管壁流动,不断地与支架植入时已损伤的内皮层发生接触和碰撞,从而促进血小板活性增加和在血管内皮下层的黏附和聚集。低剪切力区内相应血流速度也非常低,形成血流淤滞区,血小板在该区域滞留,易被诱导与血管内皮下组织中的Ⅵ型胶原蛋白、纤维连接蛋白及层黏连蛋白发生黏附,进而形成血栓^[7]。还有研究表明^[8],白细胞介素-8(IL-8)表达与剪切力大小呈时间依赖性。在 5 dyne/cm² 以下的低剪切力作用下,IL-8 表达量随时间明显增高,并证明剪切力能诱导内皮细胞的 IL-8 基因表达。IL-8 能激活中性粒细胞,调节中性粒细胞与内皮细胞的黏附,再加上其他因素的共同作用,便形成了急性炎症反应时的病理生理变化,而急性炎症反应正是引起支架内再狭窄的因素之一。剪切力的异常还能减少内皮细胞的血管内皮保护因子和抗血小板因子的分泌和释放,从而不能有效的抑制血栓形成。另外,血流动力学紊乱形成的涡流和湍流可使血管内皮细胞失去沿定向的剪切力排列和迁移的倾向,延缓内皮细胞的再生修复。

本研究结果显示,低剪切力区随着支架厚度和支架杆密度的增加而增大(图 2D、2E),横向连接结构未对低剪切力区造成明显的影响(图 2B),而纵向

连接结构的加入使低剪切力区明显减少(图 2C),壁面低剪切力区的产生是与流动停滞密切相关的,支架杆由于突出于血管壁面,因此血液在支架杆的位置产生分离再附流动,在紧靠支架杆的侧面区域将存在着流动停滞区,其内的血流对壁面的剪切力很低,故而支架植入会产生低剪切力区。从横截面的流速矢量图(图 3)能够清楚地看到血流停滞区的存在,各模型均在支架杆侧面形成低流速涡流区,由于该区域血流速度很低,故可以视为血流停滞区。通过对比图 3A 与图 3D 可以发现,在分离再附流动过程中,停滞区的大小是与支架厚度(血流梯度)呈正相关的。从图 3A 与图 3E 对比中可见,由于 A 和 E 模型中支架厚度相同,所以对于 A 和 E 中独立的一根支架杆来说,其侧面的血流停滞区大小并无明显差别。但 E 的网格密度为 A 的 2 倍,故 E 相当于将 A 中的一个分离附流动区分割成若干个连续的停滞区,致使停滞区增大,相应的 E 中低剪切力区也较 A 明显增加。同理,模型 C 中由于纵向连接结构的加入,在保证支架几何结构稳定的同时降低了网格密度,也就降低了血流流动过程中发生分离附流动的次數,减少了血流停滞区和低剪切力区。而模型 B 中引入的“V”型横向连接结构则未能起到很好的降低网格密度的作用,故低剪切力区降低不明显。由此可见,网格密度高低和低剪切力区大小也

呈正相关。

综上所述, 支架植入后管壁低剪切力区形成、支架杆周血流停滞区出现等血流动力学改变和支架内再狭窄关系密切, 而支架厚度和(或)网格密度的增加可以导致上述血流动力学改变的发生, 说明支架厚度和网格密度是支架内再狭窄的促进因素。而纵向连接结构的加入使低剪切力区明显减少, 可以降低支架内再狭窄的发生概率。

[参考文献]

- [1] James E, Moore JR, Joel LB. Fluid and solid mechanical implications of vascular stenting[J]. Ann Biomed Eng, 2002, 30: 498 - 508.
- [2] Andreas OF, Peter WW, James EM. Computational fluid dynamics and stent design[J]. Art Org, 2002, 26: 614 - 621.

- [3] Frank AO, Walsh RW, Moore JE. Computational fluid dynamics and stent design[J]. Artif Organs, 2002, 26: 614 - 621.
- [4] Choi HW, Barakat AI. Numerical study of the impact of non-Newtonian blood behavior on flow over a two-dimensional backward facing step[J]. Biorheology, 2005, 42: 493 - 509.
- [5] John FL, David CW, Ismail G, et al. Stent geometry and deployment ratio influence distributions of wall shear stress: three-dimensional numerical simulations exploiting properties of an implanted stent[J]. 2003 Summ Bioengin Confer, 2003, 6: 845 - 846.
- [6] Qiao AK, Liu YJ. Endovascular stent for thoracic aneurysm: numerical study[J]. Biorheology, 2005, 42: 137 - 138.
- [7] 欧阳端. 血液流变学及其在支架植入术后的变化[J]. 介入放射学杂志, 2002, 11: 382 - 384.
- [8] Pakala R, Watanabe T, Benedict CR. Induction of endothelial cell proliferation by angiogenic factors released by activated monocytes[J]. Cardiovasc Radiat Med, 2002, 3: 95 - 101.

(收稿日期: 2008-10-06)

·病例报告 Case report·

覆膜支架治疗颈内动脉海绵窦段巨大动脉瘤一例

刘 涛

[关键词] 动脉瘤, 颈内动脉; 覆膜支架; 植入

中图分类号: R543.4 文献标志码: D 文章编号: 1008-794X(2009)-04-0300-02

Treatment of huge internal carotid aneurysm in cavernous sinus by using covered stent: report of one case LIU Tao. Department of Cerebral Surgery, No. 1 Municipal Hospital, Harbin 150010, China (J Intervent Radiol, 2009, 18: 300-301)

[Key words] intracranial aneurysm; covered stent; implantation

病例报告

患者女, 38 岁。头痛 3 年余, 左眼脸上提无力伴复视近 1 年。体检: 神志清醒, 语言流利, 颈软, 左眼睑稍下垂, 眼裂无明显变窄, 左眼球向上、下、内活动受限, 外展正常; 右眼眼裂正常, 眼球活动自如。双侧瞳孔不等大左为 4.5 mm: 右为 2.5 mm, 间接对光反射: 左眼稍迟钝, 右眼灵敏, 余神经系统检查正常。DSA 造影发现左侧颈内动脉海绵窦段巨大动脉瘤, 大小 21.2 mm × 17.0 mm, 瘤颈宽 11.0 mm, 患者术前 3 d 开始服用抗血小板药物氯吡格雷首剂 300 mg, 以后 75 mg/d 维持剂量和阿司匹林 300 mg/d, 术后继续服药氯吡格雷 75 mg 1 个月和阿司匹林 100 mg/d, 然后改为阿司匹林 100

mg/d 维持 1 年, 定期检测凝血功能。手术步骤: 患者在气管内麻醉下行全身肝素化, 患侧颈内动脉多角度造影, 选好工作角度, 测量动脉瘤颈两端颈内动脉直径, 远端 3.4 mm, 近端 3.8 mm, 测量点相距约 15.6 mm, 据此选用 4 mm × 19 mm 的 Jostent 覆膜球囊扩张支架。首先将 6 F 导引导管导入左颈内动脉, 然后在标准侧位路图下将 0.014 英寸的 Marker Wire 微导丝 (195 cm 长, 直径 0.36 mm) 配合 Jostent 覆膜支架送入导引导管; 当支架进入颈内动脉后, 将微导丝送入左侧大脑中动脉 M2 段; 然后将覆膜支架沿着导丝送至远端超过瘤颈 5 mm, 达到满意的位置后用压力泵加压至 8 atm, 迅速减压, 造影见动脉瘤仍有显影, 再次加压至 14 atm, 造影示动脉瘤无显影后撤除球囊, 多角度造影明确动脉瘤完全闭塞 (图 1), 载瘤动脉以及眼动脉通畅并且无狭窄, 术后肝素化 24 h, 局部穿刺口加压包扎。术后左侧眼睑下垂稍好

作者单位: 150010 哈尔滨市第一医院脑外科

通信作者: 刘 涛

响

作者: [吴瑕](#), [徐克](#), [肖亮](#), [张曦彤](#), [苏红英](#), [冯博](#)
 作者单位: [中国医科大学附属第一医院放射科, 沈阳, 110001](#)
 刊名: [介入放射学杂志](#) ISTIC PKU
 英文刊名: [JOURNAL OF INTERVENTIONAL RADIOLOGY](#)
 年, 卷(期): 2009, 18(4)
 被引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. James E, Moore JR, Joel LB. Fluid and solid mechanical imoliations of vascular stenting[J]. Ann Biomed Eng, 2002, 30:498-508.
2. Andreas OF, Peter WW, James EM. Computational fluid dynamics and stent design[J]. Art Org, 2002, 26:614-621.
3. Frank AO, Walsh RW, Moore JE. Computational fluid dynamics and stent design[J]. Artif Organs, 2002, 26:614-621.
4. Choi HW, Barakat AI. Numerical study of the impact of nonNewtonian blood behavior on flow over a two-dimensional backward facing step[J]. Biorheoiology, 2005, 42:493-509.
5. John FL, David CW, Ismail G, et al. Stent geometry and deployment ratio influence distributions of wall shear stress: three-dimensional numerical simulations exploiting properties of an implanted stent[J]. 2003 Summ Bioengin Confer, 2003, 6:845-846.
6. Qiao AK, Liu YJ. Endovnsular stent for thoracic aneurysm: numerical study[J]. Biorheology, 2005, 42:137-138.
7. 欧阳塘. 血液流变学及其在支架植入术后的变化[J]. 介入放射学杂志, 2002, 11:382-384.
8. Pakala R, Vatanabe T, Benedict CR. Induelion of endothelial cell proliferation by angiogenic factors released by activated monocytes[J]. Cardiovasc Radiat Med, 2002, 3:95-101.

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [王桂红](#), [姜卫剑](#), [王拥军](#), [杜彬](#), [金旻](#) [大脑中动脉狭窄支架成形术后狭窄段血流动力学异常的可能机制 - 中风与神经疾病杂志](#) 2007, 24(5)

目的 探讨大脑中动脉(MCA)支架成形术后短期内的血流动力学变化规律, 分析术后狭窄段异常动力学改变的可能原因. 方法 对于抗栓治疗期间仍有症状发作的MCA中重度狭窄患者, 完成MCA支架成形术, 应用经颅多普勒超声(TCD)技术, 系统评价术前及术后3d内的血流动力学变化. 根据血流动力学的变化, 并结合临床及影像学改变分析血流动力学异常的可能机制. 结果 29例患者(31条MCA中)完成了支架成形术, 27条动脉支架术后3d内狭窄段的TCD频谱恢复至接近正常的水平. 4例患者(4条动脉)3d内狭窄段又出现了狭窄样频谱, 2例CT显示颅内出血. 可能的原因: 3例考虑过度灌注综合征, 1例MCA下干狭窄加重. 结论 对于MCA支架成形术后血管开通良好但TCD提示仍然存在或再次出现狭窄样频谱的患者, 过度灌注综合征及其它部位的狭窄可能是常见原因.

2. 学位论文 [杨志刚](#) [新型血管内支架治疗颅内动脉瘤的动物实验研究](#) 2008

颅内动脉瘤是神经外科常见的疾病, 其破裂所致的蛛网膜下腔出血有很高的致死率和致残率. 手术夹闭疗效确切, 但存在创伤大、难度高、时间窗受限、可治疗部位受限等不足. 微弹簧圈栓塞的优势已得到大规模随机临床实验的证实, 却也存在易于复发、难以满意治疗特殊类型动脉瘤的缺陷. 研究表明, 颅内动脉瘤治疗的最终目标是实现瘤颈部的解剖愈合, 达到载瘤血管的重建, 这需要通过治疗使动脉瘤内血流动力学发生显著变化, 进而促使瘤内稳定的血栓形成. 以血管重建为治疗目标的单纯网孔支架植入治疗动脉瘤技术, 不仅可以治疗宽颈、微小、夹层动脉瘤等特殊类型动脉瘤, 又避免了弹簧圈栓塞操作致动脉瘤破裂的风险, 在临床和实验研究方面都有成功的证据支持, 具有潜在的临床应用前景, 但目前临床使用的网孔支架由于孔率(Porosity)支架中非金属覆盖面积与支架总面积的比值)较高, 单独使用不易使动脉瘤内形成稳定血栓. 为了达到充分改变动脉瘤内血流动力学状态以诱发瘤内血栓形成, 同时保持载瘤动脉上相关正常分支血管通畅, 我们设计制造了三种不同孔率的新型血管内支架(NES). 本实验通过将其植入犬活体动脉瘤模型瘤颈部及椎动脉, 观察不同孔率的NES对血流动力学的影响情况及促使动脉瘤内血栓形成的效能, 探讨其对正常分支血管通畅性的影响, 深入研究瘤颈处新生内膜的生长机制以及新型支架植入后的血管壁反应情况, 为最终将新型血管内支架投入临床提供证据.

第一部分: 犬颈动脉多枚侧壁动脉瘤模型的建立

目的: 建立犬颈动脉侧壁多枚动脉瘤模型, 观察模型的形态学和血流动力学特征.

方法: 以显微外科缝合技术于17条犬的双侧颈动脉建立多枚动脉瘤模型. 动物随机分为3组, 分别采用术中肝素化、术后肝素化和不肝素化三种处理, 于模型建立后1w或2w及1m行血管造影确认结果. 建立模型后2w和1m的12枚动脉瘤行病理学检查, 不同抗凝处理条件的动物其模型建立结果行统计学比较.

结果: 成功建立了38枚侧壁宽颈动脉瘤, 血管造影示血流从动脉瘤远侧壁进入瘤内, 沿着瘤壁从近侧壁流出, 流速较快, 瘤腔中心有小的涡流. 术后肝

素化和不肝素化组分别有1枚和6枚动脉瘤自闭。常规肝素化组与术后肝素化组血栓形成率无差异(Nemenyi法:P=0.149)。组织病理学提示2w的动脉瘤内有较明显的内膜增生和炎症反应,瘤颈处缝线无完整内膜覆盖。1m时动脉瘤瘤颈处缝线有完整内膜覆盖,瘤壁炎症反应消退,流入道受血流冲击处可见瘤壁内膜增生。

结论:通过显微外科手术可以建立形态学和血流动力学与人颅内动脉瘤相似的直管侧壁动脉瘤模型,建模术后肝素化与术中肝素化可达到同样的抗凝效果,外科缝合建立动脉瘤可控性好,并可实现自身对照和空白对照,可用于对动脉瘤治疗技术的研究。

第二部分:新型血管内支架植入治疗动脉瘤及瘤腔内测压分析

目的:评价新型血管内支架(NES)治疗颅内动脉瘤的技术可行性;了解以单纯NES植入治疗动脉瘤过程中瘤腔内压力变化情况,分析支架释放对瘤腔内压力的影响。

方法:设计制作中央部分孔率较低而两端孔率较高的球囊扩张NES,依中央低孔率部分的孔率递减顺序型号分别为9、12、15。选择9条成功建立侧壁动脉瘤模型的大以单纯NES植入治疗动脉瘤,以支架中央孔率较低的部分覆盖动脉瘤颈,过程中以尾端连接生物信号分析仪的微导管用于动脉瘤腔内及载瘤动脉内实时测压,分析计算在支架植入前、植入过程中、植入后瘤腔内压力,并记录载瘤动脉内压力数据。不同时间点和不同支架类型的压力数据进行统计学分析。

结果:共以NES成功治疗动脉瘤17枚,所有动脉瘤术后即刻有血流减慢,其中12枚即刻瘤体减小。满意获得了15枚动脉瘤的压力数据,在支架植入前,植入过程中,植入后的瘤腔内压力和载瘤动脉内的压力平均值分别为103.41mmHg、113.39 mmHg、103.60 mmHg、105.02 mmHg。支架植入过程中动脉瘤内的压力与较植入前后高(LSD:P<0.05)。不同类型的支架植入前后对瘤内的压力影响无显著性差异(P=0.970)。

结论:NES植入治疗动脉瘤有较高手术成功率和较低并发症率,可使动脉瘤内的血流动力学状态在短时间内发生改变,即刻疗效明显。通过微导管测得的动脉瘤腔内的压力与载瘤动脉内的压力相近,NES植入不影响动脉瘤腔内的压力值,球扩支架在瘤颈部释放的过程中可引起瘤腔内的压力一过性升高。

第三部分:新型血管内支架植入治疗动脉瘤的影像随访及血流动力学定量分析

目的:了解不同孔率的新型血管内支架(NES)治疗动脉瘤的中短期效果,探讨以定量方法研究支架植入后的动脉瘤内血流动力学的方法,寻找能够预测支架植入后动脉瘤内血栓形成可能性的定量参数。

方法:9条成功建立动脉瘤模型的实验犬进行三种孔率的NES植入术前、后及术后2w,1m,3m行血管造影检查,评估动脉瘤大小、有无血栓形成,随访支架位置、形态。从造影图像上选取动脉瘤瘤体为兴趣区(ROI),测量记录兴趣区平均灰度随时间变化的情况,绘制时间密度曲线(TDC)。将动脉瘤内的血流动力学情况建立成由对流部分和弥散部分组成的数学模型,以最小二乘法从所得TDC拟和曲线方程,得出分别反映对流相和弥散相血流比例的定量参数 ρ_{conv} 、 ρ_{diff} 和反映两相血流持续时间的参数 τ_{conv} 、 τ_{diff} ,相关参数行统计学分析。

结果:支架植入后最长3m的随访时间内,7枚动脉瘤获得治愈,8枚有不同程度的血栓形成,治疗显效率为100%,3种不同孔率的NES的治疗效果之间未见差异。通过动脉瘤内血流的时间密度曲线可拟和出数学方程,并获得有物理意义的定量参数。定量参数 ρ_{diff} 、 ρ_{conv} 、 τ_{diff} 、 τ_{conv} 在支架植入前后有显著性差异(Wilcoxon:P=0.001),术后有保护意义的弥散相血流比例增加,两相血流的持续时间均较术前延长。不同支架类型术前后的参数变化无显著性差异。术前术后定量参数的变化与治疗结果之间相关,参数 ρ_{diff} 和 ρ_{conv} 可纳入对治疗结果预测的回归方程,可以对动脉瘤内血栓形成的几率做出预测。

结论:三种孔率的NES植入均能通过改变动脉瘤内的血流动力学状态促使瘤内血栓形成,但支架效能之间无统计学差别,绘制时间密度曲线拟和数学方程是有效的定量分析动脉瘤内血流动力学变化的手段。通过术后即刻的定量参数变化可对未来动脉瘤内形成血栓的可能性进行预测。

第四部分:新型血管内支架治疗动脉瘤的组织病理学研究

目的:探讨新型血管内支架(NES)植入治疗后动脉瘤颈处新生内膜的生长机制及不同孔率NES对内膜生长的不同影响,进一步评价单纯新型支架植入治疗动脉瘤的有效性。

方法:1条犬于术后8天死亡,2条犬于术后1个月处死,1条犬术后2月处死,4条犬于术后3m处死获取动脉瘤标本。对所有标本进行大体观察,8天犬及1m,3m犬各1条行扫描电镜检查,1m、2m犬各1条,3m犬2条行树脂包埋切片检查。

结果:标本大体观察示:术后8天植入型号为12的支架的动脉瘤腔内有新鲜血栓形成而型号为9者未见血栓。术后1m的动脉瘤可见植入支架型号为12、15者各1枚动脉瘤完全闭塞,型号为9者动脉瘤腔内有部分血栓形成,1枚支架未打开者此侧颈动脉完全闭塞。术后3m标本植入支架型号为12的动脉瘤中完全闭塞者、部分血栓形成者和无瘤内血栓形成者各1枚;植入支架型号为9的动脉瘤可见1枚闭塞,3枚有部分血栓形成。除1枚术后8天的动脉瘤外,所有动脉瘤瘤颈部均有不同程度大体可见的新生内膜部分覆盖,动脉瘤完全闭塞者瘤颈部内膜完整。树脂包埋切片示支架网丝将血管中膜拉长,网丝周围有新生的平滑肌细胞包绕,1m和3m标本载瘤动脉内支架均已完全被内膜所覆盖,未观察到内膜的过度增生。扫描电镜见瘤颈部内膜的覆盖在术后8d的标本即存在。新生内膜表层大部分为胶原纤维,部分靠近支架网丝的新生内膜表面覆盖鹅卵石状排列的内皮细胞,瘤颈处支架网丝被部分新生内膜覆盖。不同孔率的NES内膜生长情况无明显差别。

结论:NES植入可以促进动脉瘤内血栓形成和瘤颈处新生内膜的生长,其效果可发生在植入后早期,且效果随孔率降低和支架在瘤颈处的平整程度提高而更明显。在3m的随访时间内,正常植入的NES植入不引起载瘤动脉内的内膜过度增生。

第五部分:新型血管内支架对正常分支血管影响的实验研究

目的:研究新型血管内支架(NES)植入对正常分支血管血流的影响情况。

方法:将8枚新型球扩血管内支架植入7条大的椎动脉颅外段覆盖细小肌支,分别于术后2w,1m,3m行血管造影随访,其中1例双支架治疗者第3次行2m随访,观察支架对分支血管的通畅性和血流的影响。并于2m,3m行树脂包埋切片及扫描电镜检查。

结果:所有支架植入过程顺利,血管造影提示所有支架涉及的分支血管在最长3m的随访时间内均保持通畅,所有样本未见内膜过度增生和支架内狭窄。大体病理提示支架所涉及到的分支血管共9条,椎动脉肌支测量平均直径 $740 \pm 123\mu m$ 。无论是否有支架网丝覆盖,所有的血管分支开口均保持通畅。树脂包埋切片提示支架段血管中膜拉长,支架被薄层新生内膜覆盖,内膜增生不明显。扫描电镜显示分支血管周围的内膜生长速度明显较管壁其他部位缓慢,覆盖分支血管的支架网丝表面在3m的随访时间内尚无完整的内膜覆盖。

结论:在3m的随访区间内,三种型号新型血管内支架植入均不影响正常分支血管的通畅性,正常的分支血管内血流对内膜生长可能有抑制作用。

3. 期刊论文 [张星, 黄清海, 施洋, 余钊胜, 邵雪明, 刘建民, ZHANG Xing, HUANG Qing-hai, SHI Yang, YU Zhao-sheng, SHAO Xue-ruing, LIU Jian-min](#) 支架孔率对脑动脉瘤血流动力学影响的三维数值模拟研究 -介入放射学杂志

2009, 18(3)

目的 探讨不同支架网孔密度对支架植入后脑动脉瘤内血流动力学的影响. 方法 建立宽颈的弯曲管侧壁型动脉瘤血流动力学三维数值模型, 比较不同网孔密度支架植入前后, 动脉瘤内血流动力学变化. 结果 动脉瘤远侧壁的速度峰值与壁面剪应力随着支架孔率下降而降低. 瘤颈远侧壁及瘤顶部的压力场与支架孔率无明确的相关性. 结论 数值模拟研究证实支架孔率是影响动脉瘤内血流动力学的关键因素, 合适的支架孔率设计对动脉瘤血管重建治疗至关重要.

4. 期刊论文 [李宝民, 李生, 王君, 曹向宇, 许百男, 周定标, LI Bao-min, LI Sheng, WANG Jun, CAO Xiang-yu, XU Bai-nan, ZHOU Ding-biao](#) 颈动脉狭窄支架成形术中应对血流动力学变化的临床探讨 -中华外科杂志2007, 45(4)

目的 探讨颈动脉狭窄支架成形术中应对血流动力学变化处理措施的有效性. 方法 对前期80例患者术中未作特殊处理; 后期125例行支架成形术的患者术中严格控制血压在个体正常值的下限, 心率升高至80 次/min后开始扩张狭窄并放置支架. 结果 前80例患者并发症为8. 8%, 严格调控血流动力学的125例患者未见明显并发症. 随访1个月~5年, 均无严重再狭窄发生. 结论 重视调整颈动脉狭窄支架成形术中的血流动力学变化对减少并发症, 提高治疗效果有益.

5. 期刊论文 [黄骞, 吴性江, 范欣鑫, 徐琳, 曹建民, 黎介寿, HUANG Qian, WU Xing-jiang, FAN Xin-xin, XU Lin, CAO Jian-min, LI Jie-shou](#) 膨体聚四氟乙烯覆膜支架与裸支架对颈静脉肝内门体分流术后门静脉系统血流动力学的影响 -中华普通外科杂志2010, 25(5)

目的 对比研究膨体聚四氟乙烯(ePTFE)覆膜支架与裸支架对肝硬化门静脉高压症患者经颈静脉肝内门体分流(TIPS)术后门静脉系统血流动力学的影响.方法 对2007年4月至2009年4月收入南京军区总医院普通外科的60例门静脉高压症患者行TIPS术,术中分别应用8mm直径裸支架和8 mm直径ePTFE覆膜支架.术后观察临床疗效,并应用门静脉造影直接测压及彩色多普勒超声监测手术前后及随访过程中门静脉系统血流动力学参数的变化.结果 所有患者均顺利完成TIPS术,术中未出现操作并发症.术后随访裸支架组平均(8±4)个月,覆膜支架组为(6±4)个月.TIPS术后两组门体压力梯度分别下降约60%及58%($t=0.79$, $P>0.05$),术后裸支架组门体压力梯度逐渐上升[(13.2±1.2)mm Hg],而覆膜支架组保持在术后水平[(9.5±2.9)mm Hg],二者之间相比差异有统计学意义, $P<0.05$.超声多普勒显示TIPS术后覆膜支架组门静脉系统血流速度和流量参数均显著高于裸支架组,肝内分流道流速及流量参数高于裸支架组[(125±20)cm/s比(88±13)cm/s、(1816±380)ml/min比(1074±239)ml/min],差异有统计学意义, $P<0.01$.结论 ePTFE覆膜支架维持了TIPS术后门静脉系统及分流道内的高速、高流量血流,维持了较低的门体压力梯度,提高了TIPS术后分流道的通畅率.

6. 会议论文 [李宝民](#). [李生](#). [王君](#). [曹向宇](#). [许百男](#). [周定标](#) 颈动脉狭窄支架成形术中应对血流动力学变化的临床探讨

2007

由于在血管内治疗中存在明显血流动力学变化等因素,对支架成形效果构成一定的负面作用。本文对经血管内支架成形治疗205例颈动脉狭窄术中的应对措施进行了分析总结。

7. 期刊论文 [王凯华](#). [陈鹏](#). [林苗](#). [黄旭梅](#). [杨丽翠](#). [王军](#). [孙军](#) 高频超声评价颈动脉支架术后血管重构以及血流动力学的改变 -中国超声医学杂志2009, 25 (4)

目的 研究颈外段颈动脉狭窄支架植入术(carotid artery stenting CAS)后血管重构以及血流动力学的改变.方法 45例(53条)颈动脉狭窄行自膨胀式支架植入术患者,在术后3 d内、3、6、12、24个月分别测量支架近心端、中间段、远心端内径,支架内新生内膜厚度,支架颈内动脉段收缩期峰值流速(PSV)=ICA)及舒张末期流速(EDV)=ICA)、颈总动脉段收缩期峰值流速(PSV=CCA);术前根据斑块的病理成分和相应的组织回声,分为软斑块(12条)、混合斑块(29条)和钙化斑块(12条).结果 支架的各节段内径在术后2年中持续增加($P<0.01$),以中间段最明显;支架内新生内膜在术后3~12个月持续增生($P<0.01$),第2年增长趋势缓慢($P>0.05$), $PSV=ICA/PSV=CCA$ 在术后12个月亦持续增加($P<0.05$),第2年有所下降;支架自膨胀程度与术前斑块的性质密切相关:软斑块组>混合斑块组>钙化斑块组($P<0.01$).结论 支架内新生内膜增生(负重重构)主要表现在术后第1年,并有可能发展为支架内再狭窄;支架的自膨胀(正重构)在第2年占优势,特别表现在支架中间段;术前颈动脉狭窄为严重钙化斑的支架术后自膨胀相对较差,还是首选外科手术为佳(如颈动脉内膜剥脱术等).

8. 学位论文 [吴昉](#) 腔内修复术治疗主动脉疾患预后影响因素及主动脉支架血流动力学研究 2009

主动脉瘤、夹层动脉瘤是介入治疗工作中比较常见的严重血管疾病。传统的外科手术损伤大,病人往往不能耐受,而腔内修复术避免了传统外科手术所造成的巨大创伤,减少了心、肺等器官的严重并发症,住院周期也明显缩短,为许多患者提供了治疗机会。尽管主动脉腔内修复术治疗胸腹主动脉疾患在我国已经开展近十年的时间,但国内针对主动脉疾患腔内修复术预后的影响因素分析却未见报道。

虽然近年来腔内修复术在国内外的介入工作者共同努力下日臻完善,但仍有许多问题亟待解决。特别是对于累及左锁骨下动脉的主动脉瘤/夹层动脉瘤中左侧锁骨下动脉的处理仍存在许多争议。针对此问题,传统的方法为行介入治疗前行左锁骨下动脉动静脉bypass术,此法可能发生多种致命性并发症,腔内修复术中单纯封闭左侧锁骨下动脉目前被广泛的应用于临床,但此法并不适用于全部的患者。因为部分患者的左锁骨下动脉对于脑循环有重要的意义,故近期的文献均主张尽可能的应用腔内技术保留左侧锁骨下动脉;应用主动脉侧孔支架和分支支架是目前应用较多的两种能够保留左侧锁骨下动脉的腔内技术,均有小规模的临床报道,本研究旨在应用计算流体力学软件分析分支型主动脉支架和侧孔支架置入后血管内血流动力学的变化,并就两种支架对血流动力学的影响进行比较。

本研究通过对腔内修复术后患者进行随访,分析术后瘤体变化规律,并建立CoX生存分析模型,分析患者高血压等级、是否合并肾功能不全等因素与腔内修复术预后的相关性,筛选出影响腔内修复术疗效的有关因素。应用计算流体力学软件分析支架构型特点对血流动力学的影响,并分析比较分支型主动脉支架和侧孔支架置入后血管内血流动力学的变化,以期对支架的设计和选择有所帮助。

材料和方法:

2000年11月至2007年10月在中国医科大学附属第一医院行腹主动脉瘤腔内修复术的87例患者,经影像学证实为腹主动脉瘤的患者46例、主动脉夹层患者41例。所有患者术前均行CT血管造影和计算机三维重建。术中共应用3种覆膜血管支架,包括Talent主动脉支架(Medtronic公司)、Zenith主动脉支架(Cook公司)、国产微创主动脉支架(北京裕恒佳公司)。所有患者均在导管室内进行腔内修复术。采用临床资料回顾性分析的方法,经过查阅病历,根据事先拟订好的调查表逐项填写。调查内容主要包括发病年龄、性别、瘤体大小、动脉瘤颈部位、生存时间、是否合并高血压、冠心病、肾功能不全等临床、影像学指标。应用统计学软件SPSS13.0进行多因素回归分析,筛选出与腔内修复术预后有关的影响因素,建立COX生存分析模型。其中27例影像学资料连续完整的病例,对于术前、术后6个月、12个月的瘤体直径进行方差分析,观察腔内修复术后瘤体变化的规律。

应用Pro/engineer wildfire3.0依据正常人体主动脉弓及其分支平均管径建立模型,其中主动脉主干直径27mm,左锁骨下动脉直径8mm,分支血管与主干血管呈76°相交。主干内支架采用临床上最常用的主动脉支架构型,支架厚度为1mm,每个支架环长8mm,每个圆周上包括6个“V”型单元。因为本研究只针对分支部位的流体动力学,所以长度方向上只有2个支架环。模型A为无支架的正常血管模型作为对比,模型B为支架置入的理想状态,即分支开口完全敞开,主干的支架架未突入分支开口处,模型C为主干支架的某个“V”型单元突入分支开口处,且这个“V”型单元的两根支架杆关于分支血管截面中心线对称,模型D为某单根支架杆突入分支开口处。将模型导入计算流体力学软件ANASY11.0-CFX中建立流体模型,规定边界条件后进行计算流体动力学分析。

结果:

1. 有三个因素进入了腔内修复术的最终模型,分别是X2(高血压)、X3(肾功能不全)和X5(瘤体直径)。由此建立的腔内修复术模型为: $h(t, x) = h_0(t) \exp(3.131X_2 + 6.743X_3 + 2.111X_5)$ 。
2. 术前瘤体直径与术后6个月、12个月比较都有统计学差异,而术后6个月和术后12个月瘤体直径之间没有统计学差异。
3. 主动脉矢状剖面上的速度矢量图中,模型A、B、C、D的截面低速涡流区面积所占百分比分别为31.2%、33.4%、41.2%、59.4%,可见模型B、C中涡流区分布与A相仿,C中涡流区略大于A,模型D面积明显大于对照组A。
4. 分支血管起始部横截面上的速度矢量图中,模型A和B没有显而易见的差别,两者中低速区所占总面积的百分比分别为21.2%和22.8%。模型C中图像上部月牙形低速区和对照组A基本相同,模型D中形成了大面积(比例为78.2%)的低速涡流区。
5. 分支血管纵切面上的速度矢量分图中,模型A和B无明显差异。模型C与对照组相比略有不同,在“V”型支架杆的两个对称的分支周围血流分别发生分离再附流动,两股血流完全对称,方向相向,互相抵消,最终血流仍保持向上的射流趋势。模型D中形成多个偏中心的低速涡流区。
6. 各模型分支血管壁面的低剪切力区(深蓝色区域, <0.55Pa)面积所占总面积比例分别为12.8%、18.1%、20.2%、65.8%,模型B、C分支血管壁面低剪切力区多于对照组A,且都分布在分支血管内支架周围,而模型D分支血管壁面低剪切力区明显大于前三者。
7. 模型B与对照组模型A中血流速度和剪切力分布没有明显差异,模型D中分支血管内血流速度明显减慢,并且形成了大量杂乱的偏中心涡流区,血管壁遍布低剪切力区,而模型C对于血流的影响介于B和D之间。

结论:

1. 是否合并高血压、肾功能不全及瘤体直径是影响腔内修复术预后的相关因素。
2. 支架厚度和网格密度是支架内再狭窄的促进因素。而纵向连接结构的加入使低剪切力区明显减少,可以降低支架内再狭窄的发生几率。
3. 从血流动力学角度分析推断,采用分支型主动脉支架行腔内隔绝术较应用侧孔支架更有利于维持左锁骨下动脉的远期通畅,是治疗累及左锁骨下动脉的动脉瘤的良好方法。

9. 期刊论文 [褚建国](#). [孙晓丽](#). [邹一军](#). [黄鹤](#). [周华](#). [吕春燕](#). [杨淑惠](#). [CHU Jian-guo](#). [SUN Xiao-li](#). [ZHOU Yi-jun](#). [HUANG He](#). [ZHOU Hua](#). [LV Chun-yan](#). [YANG Shu-hui](#) 预应力支架的结构与经皮经肝肝内门腔静脉分流术血流动力学关系的研究 -介入放射学杂志2006, 15 (11)

目的 介绍一种全新肝内分流支架的结构和在经皮经肝肝内门腔静脉分流术(PTPS)中应用的临床结果. 分析应用该支架建立的门腔静脉分流道与经典TIPS所用支架血流动力学之间的差异, 探讨其潜在的临床意义. 方法 38例门静脉高压症患者采用预应力支架行PTPS. 其中静脉曲张出血36例, 难治性腹水1例及肝肺综合征1例; 肝功能Child Pugh B级27例、C级11例. 经皮经肝穿刺进入门静脉右支, 再经门静脉左支矢状部穿刺肝段下腔静脉, 经皮经肝植入预应力支架于门静脉左支与肝段下腔静脉之间. 结果 38例采用预应力支架行PTPS均获成功, 技术成功率100%, 术中未出现与技术相关并发症, 术后门腔压力梯度平均下降14 cmH₂O, 平均随访493 d, 所有患者未发生再出血, 难治性腹水得到有效地控制. 初步开通率达98. 9%. 结论 采用预应力支架经皮经肝途径建立门腔静脉分流安全可行, 其血流动力学结果提示预应力支架形态及与相关血管壁间“吻合”严密, 符合正常肝内门静脉血流动力学分布, 既起到门静脉部分性降压作用, 又保障了门静脉右支血流的肝内灌注, 对术后预防分流道再狭窄及降低肝内分流术后肝性脑病发生率具有重要的临床意义.

10. 期刊论文 [申红亚. Shen Hong-ya 人工瓣膜置换对血流动力学影响的系统分析 -中国组织工程研究与临床康复](#)

2009, 13 (26)

目的: 评价人工瓣膜置换后的血流动力学性能, 分析不同类型、不同外径人工瓣膜对血流动力学的影响. 方法: 以计算机检索方法检索中国期刊全文数据库中(CNKI: 2001/2008)关于人工瓣膜置换相关文献, 检索词为“人工瓣膜、瓣膜置换”. 检索后对每项研究的资料结果进行提取、分析. 结果: 共有13项实验770例心脏瓣膜病患者符合纳入标准, 人工瓣膜置换后左房内径、最大跨瓣压差、平均跨瓣压差和峰值流速均较置换前显著降低, 左室射血分数较置换前显著升高; 双叶瓣与单叶瓣比较, 双叶瓣置换后左房直径、最大跨瓣压差、平均跨瓣压差各血流动力学指标下降较显著; 与有支架瓣膜比较, 无支架生物主动脉瓣跨瓣压差、左室射血分数等指标优于有支架生物主动脉瓣. 为小主动脉瓣患者研制的外径21 mm主动脉瓣, 初步研究显示其置换后最大跨瓣压差在22 mm Hg (1 mm Hg=0. 133 kPa) 左右, 与23 mm机械瓣的血流动力学效果相同. 结论: 人工瓣膜置换可明显改善瓣口的血流动力学及左室构型, 其中双叶瓣置换的血流动力学指标优于单叶瓣, 无支架生物瓣明显优于有支架生物瓣, 外径21 mm人工瓣膜置换后左室射血分数、最大跨瓣压差与23 mm人工瓣膜差异不明显, 有临床应用价值, 但仍需进一步临床随访观察.

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_jrfxszz200904016.aspx

授权使用: 中国科学技术大学(zgkx.jsdx), 授权号: 09b09568-23af-4c0c-a0e5-9df6017600cf

下载时间: 2010年9月19日