

文章编号:1004-7220(2010)05-0334-04

动脉血流旋动原理在人造血管研制和血管移植术中的应用

刘肖, 孙安强, 占帆, 陈增胜, 邓小燕

(北京航空航天大学生物与医学工程学院 生物力学与力生物学教育部重点实验室,北京 100191)

摘要: **目的** 将血液流动的旋动流原理用于心血管介入治疗,以期解决小口径人造血管的急性血栓堵塞问题和搭桥手术后下游处血管内膜增生引起的血管再狭窄问题。**方法** 使用计算流体力学(CFD)分别研究具有旋动流特性的新型小口径、S型搭桥和偏心搭桥模型中的流场以及壁面剪切力的分布。同时研究在旋动流下血小板的黏附情况和不同角度的S型搭桥下的血管内膜增生。**结果** 旋动流能明显提高壁面剪切力,抑制血小板的黏附以及血管内膜增生。**结论** 在心血管介入治疗和器械设计中引入旋动流确实可明显改善这些器械中的血流流场,达到抑制小口径人造血管的急性血栓形成和搭桥手术后血管内膜增生的目的。

关键词: 旋动流; 计算流体力学; 剪切力; 流场**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

Clinical application of the swirling flow mechanism in arterial prostheses and bypasses

LIU Xiao, SUN An-qiang, ZHAN Fan, CHEN Zeng-sheng, DENG Xiao-yan (Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Objective To apply the swirling flow mechanism to the design of arterial prostheses with small diameters and the arterial bypass surgery to resolve the acute thrombus in small diameter prostheses after implantation, and lessen the restenosis of bypassed arteries due to the formation of internal hyperplasia. **Method** The computational fluid dynamics (CFD) method was used to investigate the flow field and wall shear stress distribution of a new graft, an S-type bypass and an axis deviated arterial bypass, which all had the swirling flow. In addition, the platelet adhesion under swirling flow and internal hyperplasia in S-type bypass were measured. **Results** The swirling flow can apparently enhance the wall shear stress (WSS) and suppress the platelet adhesion and internal hyperplasia. **Conclusions** The swirling flow can significantly improve the flow field in arterial graft and bypass to inhibit the acute thrombus in small diameter prostheses and internal hyperplasia after bypass surgery.

Key words : Swirling flow; Computational fluid dynamics(CFD); Shear stress; Flow field

虽然引发动脉粥样硬化、血栓形成和动脉搭桥后血管内膜增生局部性的机理仍不是十分清楚,但不管其机理为何,目前科学界普遍认为血管几何形

状发生急剧变化的部位(包括搭桥处)血流受扰动而产生的流动分离及涡漩区是导致这些疾病局部性现象产生的根源。研究心血管疾病局部性的发病机

收稿日期:2010-05-10; 修回日期:2010-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10632010)。

作者简介:刘肖(1985-),男,博士研究生,研究方向:血流动力学。

通讯作者:邓小燕,教授,博士研究生导师, E-mail: dengxy1953@buaa.edu.cn。

理固然重要,但在其机理尚不十分清楚时,将这些疾病的局部性现象与血流流场有相关性这样一个事实临床上加以运用更有可取之处。

血流动力学研究发现,升主动脉处的血流呈旋动流态(血流作螺旋一样的运动)^[1-4]。主动脉弓处血流的旋动是升主动脉血管管壁光滑冲刷以防止动脉粥样硬化形成的保证。近几年研究发现,血流的旋动现象不仅仅局限在升主动脉,在腿部的大动脉和冠状动脉处也存在^[5-7]。甚至还有研究发现腿部大动脉的内壁表面并不象人们过去所认为的那样是光滑的,而是具有一些像螺线一样的结构^[5-6]。也许正是这些螺线结构,使得动脉内的血流呈旋动流态。这种流态的好处是:一方面,它可使血流稳定,减小湍流;另一方面,它可使血管壁得到光滑冲刷,减小血液中有毒物质(如脂质等)在血管壁的沉积。Frazin等^[4]甚至认为,由于动脉分叉空间构型的特性,灌注人体(动物)各器官的血流形态大都是旋动流态。近年来,有人已经开始了将此旋动流原理应用于临床医学的尝试^[8-9]。

本文沿此思路开展了将动脉系统旋动流原理用于心血管介入治疗和器械设计的研究工作。

1 具有旋动流特性的新型小口径人造血管流场的数值模拟

由高分子聚合物等材料制成的人造血管被成功应用于动脉旁路及重建手术已有近 50 年的历史。虽然大、中口径的人造血管已取得了令人满意的临床效果,但小口径(直径 < 6 mm)的人造血管临床效果还不尽人意;而临床上冠状动脉以及外周动脉的旁路手术中大量需要的正是小口径人造血管,因此小口径人造血管的改进显得尤为重要。

急性栓塞是造成小口径人造血管植入早期失败的一个主要原因。大量的研究表明,血栓形成主要与人造血管表面材料的化学属性以及血流动力学因素相关。Sauvage等^[10]通过对血流流速与血栓形成的相关性进行分析研究,提出了“血栓形成的临界流速”这一概念。该临界流速定义为导致人造血管内超过 50% 的内腔截面积发生血栓沉积时的平均血流速度。当血流速度低于该临界流速时,积聚在人造血管的内壁上的血栓将最终导致血管的闭塞;当血流速度超过该临界流速时,血栓的形成将受

到抑制。在小口径动脉血管中,血流的平均速度均较低,一般会低于“血栓形成的临界流速”。

受动脉系统中血流旋动现象的启发,如果在小口径人造血管内引入旋动流,将会改变人造血管内血流流场的分布,从而达到抑制小口径人造血管内急性血栓形成的目的。基于此,本文设计了一种内置旋流引导器的新型小口径人造血管^[11],对这种新型小口径人造血管的流场进行了计算机数值模拟,并将其与传统的小口径人造血管内流场进行了对比。

数值模拟结果表明:旋流引导器的植入的确可使小口径人造血管内的血流产生旋动,该旋动流的出现使血管近壁面处的血流流速及壁面剪切力均得到了显著的提高,血流动力学环境得到了明显的改善。本研究认为:近壁面处血流流速以及壁面剪切率的提升,有利于抑制血小板及白血球在植入血管内腔表面的停留及附着,进而减少血栓形成的机率。因此,在小口径人造血管中引入旋动流的益处是显而易见的。本研究为今后小口径人造血管的改进或优化设计提供了一个新的方向。

2 玻璃直管内的旋动流可抑制血小板的黏附

由于前面的研究仅仅从理论上对旋动流在小口径人造血管设计中的应用进行了探讨,其中得到的结论还仅仅是一些猜想,有待进行相关的实验来验证。为此,本文设计了一个血小板黏附的实验^[12],用以验证旋动流是否真能抑制血小板的黏附。该研究比较了普通流动和旋动流对血小板在一段平直玻璃管中黏附的影响。

图 1 为玻璃管内 2 种不同流态的壁面剪切应力分布。图 2 为旋流强度随 L 的衰减的曲线;图 3 为两种流态下血小板黏附沿 L 的分布。研究结果表明,与普通流相比较,在同样的流量下,旋动流可有效抑制血小板在玻璃管壁面的黏附。非常有趣的是,旋动流条件下,血小板在玻璃管壁面黏附的分布与普通流态有很大区别。在普通流条件下,血小板的黏附随壁面剪切应力的下降而增加。而在旋动流条件下,虽然壁面剪切应力在玻璃管实验段的前 5 mm 发生了急剧的下降,但血小板在这前 5 mm 玻璃管壁面的黏附却基本没有改变。与图 2 对照,这一结果提示血小板在玻璃管壁面的黏附不但受壁面剪

切应力影响,更受到旋动流本身的影响。当旋动流强度足够高时,旋动流本身对血小板黏附的影响占主导地位。因此,在玻璃管实验段的前5 mm,血小板的黏附不随壁面剪切应力的下降而增加。造这一黏附结果的差别的原因还有待进一步研究。本文认为,这可能与血小板在流场中的运输有关,即旋动流场中血小板的运输可能与普通流态不同。

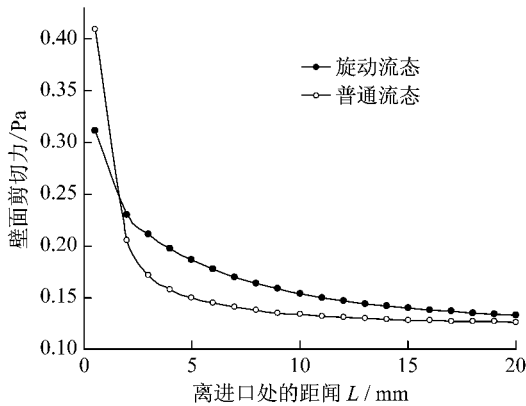


图1 平均壁面剪切力沿实验管轴向的分布
Fig.1 Plots of area-averaged WSS distribution

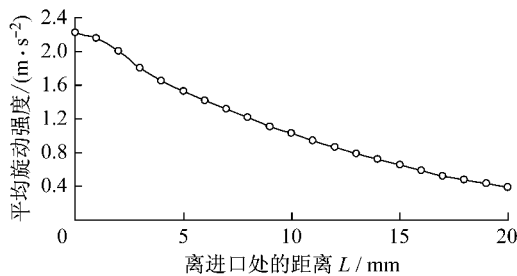


图2 旋动流模型中平均旋动强度密度
Fig.2 Plot of area-weighted average of helicity along the distance

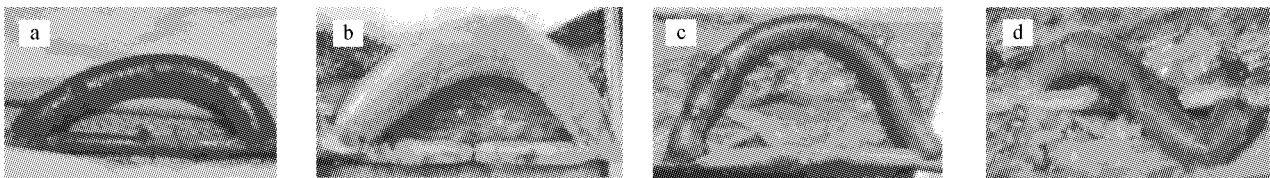


图4 4种不同的动脉搭桥(a: 30°;b: 45°;c: 60°;d: S-型动脉搭桥)^[15]
Fig.4 Schematic diagrams of four different bypass models (a: 30°;b: 45°;c: 60°;d: S-type bypass)

4 一种偏心搭桥模型的血流动力学模拟研究

本文还设计了一种用于偏心血管搭桥的人造血管^[16]。这种人造血管的特别之处在于它的末端截

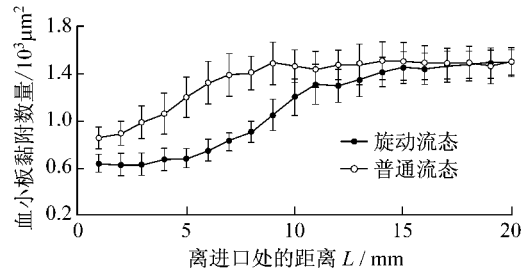


图3 两种流态下血小板的黏附密度
Fig.3 Plots of platelet adhesion density

3 S型血管搭桥术

血流的旋动流原理也许还能用来解决动脉旁路手术后(包括人造血管和自身血管)的血管内膜增生(intimal hyperplasia)再狭窄问题。搭桥术后血流受到扰动而在下游缝合处后部产生的涡流是手术吻合处主体动脉对应面的血管内膜增生根源^[13-14]。基于此,如果本研究能设法使进入搭桥血管的血流旋动前进,以消除下游缝合处后部涡流的产生,这一问题便有可能获得解决。为此,本研究采用一种S型的血管搭桥术(见图4)^[15],成功地使进入搭桥动脉血管下游end-to-side处的血流产生了旋动,从而有效地抑制了搭桥血管吻合处主体动脉对应面处的内膜增生。流场分析表明,进入搭桥动脉血管下游end-to-side处的旋动血流可使该处血流流场和流动剪切应力分布发生改变,消除吻合处主体动脉对应面引发血管内膜增生的低剪切应力区。这也许就是这种搭桥术能有效抑制搭桥动脉血管内膜增生的原因。

面腔逐渐过渡为半椭圆型。这种血管与被搭桥血管缝合后血液会从一侧注入被搭桥血管,呈现偏心状态。本文用数值模拟的方法研究了血管搭桥的血流动力学特性。计算结果显示^[16],在这种偏心搭桥模

型内产生了明显的旋动流。与传统搭桥模型对比,在偏心搭桥模型内没有产生明显的涡漩流。旋动流可以更好地实现对管壁的冲刷,消除吻合处主体动脉对应面引发血管内膜增生的低剪切应力区。因此这种偏心搭桥模型可以有效改善搭桥末端的血流动力学环境,从而有可能解决搭桥手术后内膜增生引起的血管再狭窄问题。

5 结语

本研究表明,在心血管介入治疗和器械设计中引入旋动流确实可明显改善这些器械中的血流流场,达到抑制小口径人造血管的急性血栓形成和搭桥手术后血管内膜增生的目的。本文目前正在研究旋动流原理在血管内支架和腔静脉滤器中的应用。然而,要将这一理念真正应用于临床还有很长的路要走,其中旋动流血管内支架和腔静脉滤器对微创手术安放装置有特殊的要求,需要设计新的专用导管系统。

参考文献:

- [1] Segadal L, Matre K. Blood velocity distribution in the human ascending aorta [J]. *Circ*, 1987, 76(1):90-100.
- [2] Frazin LJ, Lanza G, Vonesh M, *et al.* Functional chiral asymmetry in the descending thoracic aorta [J]. *Circ*, 1990, 82(6):1985-1994.
- [3] Kilner PJ, Yang GZ, Mohiaddin RH, *et al.* Helical and retrograde secondary flow patterns in the aortic arch studied by three-dimensional magnetic resonance velocity mapping [J]. *Circ*, 1993, 88(5):2235-2247.
- [4] Frazin LJ, Vonesh MJ, Chandran KB, *et al.* Confirmation and initial documentation of thoracic and abdominal aortic helical flow. An ultrasound study [J]. *ASAIO J*, 1996, 42(6):951-956.
- [5] Stonebridge PA, Brophy CM. Spiral laminar flow in arteries [J]. *Lancet*, 1991, 338(8779):1360-1361.
- [6] Stonebridge PA, Hoskins PR, Allan PL, *et al.* Spiral laminar flow in vivo [J]. *Clin Sci*, 1996, 91(1):17-21.
- [7] Uchida Y, Tomaru T, Nakamura F, *et al.* Percutaneous coronary angiography in patients with ischemic heart disease [J]. *Am Heart J*, 1987, 114(5):1216-1222.
- [8] Caro CG, Cheshire NJ, Watkins N. Preliminary comparative study of small amplitude helical and conventional ePTFE arteriovenous shunts in pigs [J]. *J R Soc Interface*, 2005, 2(3):261-266.
- [9] Morbiducci U, Ponzini R, Grigioni M, *et al.* Helical flow as fluid dynamic signature for atherogenesis in aortocoronary bypass. A numeric study [J]. *J Biomech*, 2007, 40(3):519-534.
- [10] Sauvage LR, Walker MW, Berger K. Current arterial prostheses: experimental evaluation by implantation in the carotid and circumflex coronary arteries of the dog [J]. *Arch Surg*, 1979, 114(6):687-691.
- [11] Zhang ZG, Fan YB, Deng XY, *et al.* Simulation of blood flow in a small-diameter vascular graft model with a swirl (spiral) flow guider [J]. *Sci China Ser C-Life Sci*, 2008, 51(10):913-921.
- [12] Zhan F, Fan YB, Deng XY. Swirling flow created in a glass tube suppressed platelet adhesion to the surface of the tube: its implication in the design of small-caliber arterial grafts [J]. *Thromb Res*, 2010, 125(5):413-418.
- [13] Bassiouny HS, White S, Glagov S, *et al.* Anastomotic intimal hyperplasia: mechanical injury or flow induced [J]. *J Vasc Surg*, 1992, 15(4):708-717.
- [14] Ojha M. Wall shear stress temporal gradient and anastomotic intimal hyperplasia [J]. *Circ Res*, 1994, 74(6):1227-1231.
- [15] Fan Y, Xu ZP, Jiang WT, *et al.* An S-type bypass can improve the hemodynamics in the bypassed arteries and suppress intimal hyperplasia along the host artery floor [J]. *J Biomech*, 2008, 41(11):2498-2505.
- [16] Sun A, Fan Y, Deng X. Numerical investigation of blood flow in the distal end of an axis-deviated arterial bypass model [J]. *Biorheology*, 2009, 46(2):83-92.