

人工血管顺应性不匹配的研究现状与展望

田元肖^a 陈嘉琳^a 焦恋杨^a 王 然^a 穆 佩^a 赵荟菁^{a,b} 孟 凯^{a,b}

苏州大学 a. 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215021,

b. 现代丝绸国家工程实验室(苏州), 江苏 苏州 215123

摘 要:人工血管顺应性与宿主血管不匹配会导致血流动力学异常,进而引发内膜增生。小口径人工血管因血管直径小,受内膜增生影响尤为严重,往往导致通畅率低或移植失败。在关注人工血管顺应性的影响因素及提高人工血管顺应性的同时,从血流与血管的流固耦合关系出发,聚焦顺应性不匹配对血流动力学和内膜增生的影响,并指出进一步值得研究的方向。研究有助于更多学者了解人工血管顺应性,进而推动解决人工血管移植后易发生内膜增生的问题。

关键词:人工血管;顺应性不匹配;血流动力学;内膜增生

中图分类号: TS 101.2;R 318.08

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)02-0001-09

Research status and prospects of artificial blood vessel compliance mismatch

Tian Yuanxiao^a, Chen Jialin^a, Jiao Lianyang^a, Wang Ran^a, Mu Pei^a, Zhao Huijing^{a,b}, Meng Kai^{a,b}

a. College of Textile and Clothing Engineering, Suzhou 215021,

b. National Engineering Laboratory for Modern Silk (Suzhou), Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu, China

Abstract: Hemodynamic abnormalities can be induced by a mismatch in compliance between artificial blood vessel and host blood vessel, which in turn can trigger intimal hyperplasia. Small diameter artificial blood vessels are particularly affected by intimal hyperplasia due to their narrow diameter, often resulting in low patency or transplant failure. While focusing on the influencing factors that affected the compliance of artificial blood vessels and the methods that improved the compliance of artificial vessels, based on the vascular fluid-solid coupling relationship, focused on the influence that compliance mismatch on hemodynamics and intimal hyperplasia, and put forward further research directions worthy of investigation. The study can help more scholars to understand the compliance of artificial blood vessels, thereby facilitating efforts to address the issue of intimal hyperplasia that is prone to occur after artificial blood vessel transplantation.

Keywords: artificial blood vessel; compliance mismatch; hemodynamics; intimal hyperplasia

基金项目:江苏省高校自然科学基金重大项目(19KJA610004)

收稿日期:2025-06-24

作者简介:田元肖,女,2004年生,在读本科生,主要研究方向为人工血管设计与制备,1573474836@qq.com

通信作者:孟凯,副教授,博士,主要研究方向为功能性医疗卫生材料,mk2009@suda.edu.cn

人工血管在治疗心脏病、血栓、动脉粥样硬化、血管夹层等心血管疾病方面发挥着重要作用^[1]。理想的人工血管,除了应具备较低的免疫反应和良好的生物相容性外,还需要有合适的顺应性,并且能够在整个移植期内保持优良的力学与生物稳定性,以确保其能够安全、有效地服务患者。人工血管顺应性是指血管对管道内血流应力的形变响应性,它受血管材料、壁厚、组织结构等综合因素的影响^[2]。当人工血管与人体血管(以下简称宿主血管)顺应性不匹配时,二者管径变化不一致,导致血管动力学异常,进而影响血管壁细胞的力学信号感受与响应机制(如血管平滑肌细胞的迁移等)^[3]。因此,人工血管顺应性不仅与血管材料、几何结构相关,还与血流动力学以及血管生物学变化密切相关。当它们之间不匹配时会导致内膜增生,这体现了人工血管顺应性与内膜增生的内在关联。

本文聚焦人工血管与移植部位宿主血管顺应性不匹配问题,回顾顺应性测试与评价方法,系统综述了顺应性不匹配对血流动力学和内膜增生的影响,以及抑制内膜增生的措施,并进一步提出了与顺应性不匹配相关的待解决问题和未来攻关方向,以期让更多学者开展人工血管顺应性不匹配方面的研究提供参考。

1 人工血管顺应性及其评价

1.1 顺应性的定义

人工血管顺应性受血管材料、几何形状、组织结构等多项参数的影响,是一个综合性指标。从广义上来讲,它是指人工血管随脉动压力的变化,血管体积、长度和管径产生变化或响应的能力,分别对应体积顺应性、轴向顺应性和径向顺应性,通常以径向顺应性表征,即管径在周期性脉动压力作用下随血压的变化,按式(1)计算^[4]。

$$M = \frac{(R_2 - R_1)/R_1}{P_2 - P_1} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: M 为人工血管径向顺应性, $\%/(100 \text{ mmHg})$,含义为压力变化 100 mmHg 时血管内径的变化率; R_1 、 R_2 分别指血管在脉动低压 P_1 (mmHg)与脉动高压 P_2 (mmHg)下的承压内径。

1.2 顺应性测试

根据径向顺应性的定义和计算式制备测试装置,其原理多为构建血流循环系统,模拟人体内的血流压力和流速并加载到人工血管上,再采用各种传感技术测量并记录人工血管的压力变化和管壁径向位移变化,进而计算顺应性值。目前国外较先进的测试仪器有美国 BOSE 公司开发的生物动态测试仪(bio-dynamic tester),该仪器不仅可以测量脉动流作用下的压力变化、直径变化,而且可以模拟体内动态环境的组织培养。

国内方面,东华大学王璐教授团队早期就开展了人工血管顺应性测试装置方面的开创性工作,包括顺应性测试仪的研发与改进,及可同步测量顺应性和疲劳性能的多功能装置的开发等^[5-6]。赵荟菁等^[7]在前期工作的基础上,研制了一种新的人工血管顺应性测试装置。该装置采用调压阀门改变脉动流的压力以模拟人体不同生理血压范围,通过激光位移传感器、压力传感器实时采集血管位移和压力,并同步传输至计算机,进一步提高了测量精度和便利性。

国外方面, Lucereau 等^[8]设计的顺应性测试装置通过摄像机记录人工血管在不同压力状态下的图像,然后基于图像处理获取人工血管的形状变化,进而评价顺应性。他们用该装置对涤纶血管进行评测,发现其顺应性在 3 h 后显著下降,并强调应该对人工血管顺应性的稳定性进行关注。

通过仪器设备对人工血管顺应性进行测试,获取的数据具有较高的可靠性,但也存在一些局限,比如专用测试设备投入大、实物制备成本高,以及样品长短和厚薄变化受限于装置等。

1.3 基于数值模拟的顺应性评价

人工血管顺应性也可通过数值模拟获得理论值。数值模拟也叫计算机模拟,是依靠电子计算机并结合有限元或有限体积的概念,通过数值计算和图像显示研究工程和物理问题的一种方法。比如, Lucca 等^[9]提出的半隐式有限体积法,专用于弹性和黏弹性血管的血流动力学数值模拟。该方法通过构建几何模型和理论方程,基于有限元或有限体积等数值方法对偏微分方程求解,并结合各类软件技术,在计算机中直观地显示复杂血流条件下的血管形变,并提取具体的数据计算顺应性值,这为人工血

管顺应性的测试评价提供了新路径。

Zahedmanesh 团队^[10]制备了一种细菌纤维素人工血管,并基于有限元法模拟了其在一定压力下的形变特征响应,进而对其动态顺应性进行了评估,重点考察了材料的应力应变本构关系对结果的影响。研究表明,通过数值模拟评价顺应性时,血管材料的本构关系是影响结果准确性的关键因素之一。

苏州大学曹婷^[11]模拟了脉动流作用下人工血管的径向扩张变形规律,并根据模拟结果计算得到了人工血管的顺应性值。该模拟过程为单向流固耦合模拟,即仅模拟流体对血管的作用,不考虑血管变形对液体的反向影响。对比模拟值和实测值发现,简化后的流固耦合模型对人工血管顺应性值影响不大,二者相差 4.5% 左右。

数值模拟方法能够通过计算机快速获取所研究问题的近似解及压力、位移等试验数据,无需实物,不受试样尺寸等几何参数限制,具有较高的效率和经济性,其不足之处在于结果准确性受模型简化与边界条件设定等方面的影响。例如,几何模型构建时,常用规则圆管代替血管,而人体血管的真实形状不规则、壁厚不均,其力学性能也非刚性或简单的线

弹性;血流常被假设为牛顿流体;双向流固耦合模型亦被简化;等等。这些假设使模拟值与实测值之间存在一定偏差,若偏差过大将增加移植失败风险,因此临床应用前须用实物模型对理论模型进行试验验证。

2 人工血管顺应性与血流动力学

血液和血管时刻相互作用,血流压力使血管产生形变,反之,血管的形变又会影响血液的流动,形成典型的流固耦合关系,人工血管的顺应性也正是在脉动血流的作用下才得以体现的。当人工血管的顺应性与宿主血管不匹配时,同样的血流压力下二者会产生不同的径向扩张位移,这会导致吻合口处发生血流突变现象,如图 1 所示。图 1a) 和 b) 分别是人工血管顺应性低于和高于宿主血管时的血液流态,2 种情况下,吻合口处都产生了血流突变现象,严重时甚至能形成血流紊乱和回流,这些异常流动是吻合口处产生内膜增生的力学诱因。因此,研究人工血管顺应性不匹配对血流动力学的影响,不仅有助于揭示内膜增生的力学因素,而且对设计人工血管具有指导意义。

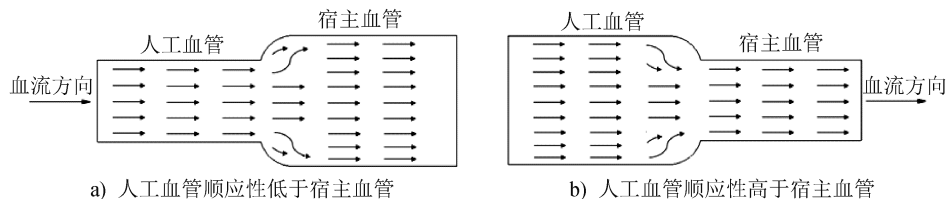


图 1 人工血管与宿主血管吻合口处的血流示意

Fig. 1 Illustration of blood flow at anastomosis between artificial blood vessel and host blood vessel

2.1 血流规律曲线

血流与血管耦合规律复杂,传统测量方法往往难以甚至无法展开探索。计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是一门利用计算机仿真和数值计算等技术,对流体力学问题进行数值求解与研究的学科。它能在复杂情况下预测和优化流体现象,是研究血流与血管相互作用的有效手段。与实际测试或试验相比,CFD 具有不受参数限制、成本低、对流场无干扰等优势。在 CFD 数值模拟中,设置血流规律曲线作为入口条件是必不可少的,这直接关系到模拟条件与实际条件的相符程度。

血流压力曲线和血流速度曲线都能反映血流的

运动规律。Jiang 等^[12]以图 2 所示的血流压力曲线作为入口条件,模拟了中凸型人工血管内的血流运动情况。宋雨杰^[13]采用图 3 所示的血流速度曲线作为入口条件 ($t_1 \sim t_7$ 分别为 0.02、0.10、0.13、0.20、0.28、0.35 及 0.50 s),进行了主动脉血管内的血流动力学数值模拟。上述曲线都近似反映了心脏收缩与舒张下动脉内的血流变化规律,表明以此类曲线作为入口条件,能够较为真实地模拟一个心动周期内血流与血管间的相互作用。

此外,血流曲线在心血管疾病的诊断和治疗中也具有重要应用价值。它不仅可以用于评估心脏瓣膜功能、判断心脏泵血状态,还可以通过监测血流动

力学变化(如血流速度、方向、压力和分布等参数)评估血管狭窄程度、血栓形成情况等,从而辅助诊断冠心病和心肌梗死等心血管疾病。

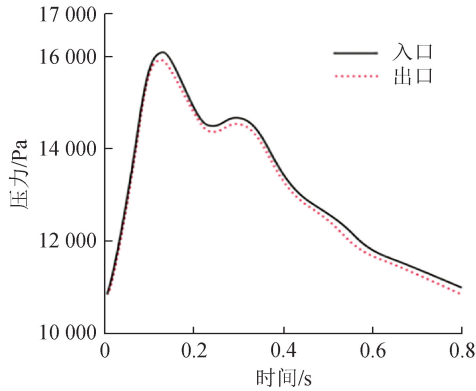


图2 一个心动周期内的血流压力曲线
Fig. 2 Blood flow pressure curve in one cardiac cycle

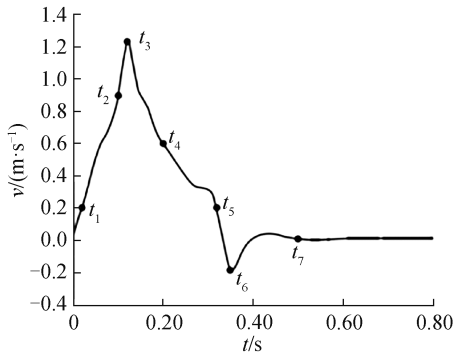


图3 一个心动周期主动脉入口血流速度曲线
Fig. 3 Blood flow velocity curve at aortic entrance in one cardiac cycle

2.2 顺应性不匹配与血流动力学数值模拟

人工血管移植后引发的一系列并发症常与血流突变或紊乱、血管壁面剪切应力(wall shear stress, WSS)和振荡剪切指数(oscillatory shear index, OSI)异常变化相关。当人工血管与宿主血管顺应性不匹配时,在相同血流压力下二者吻合口处会形成径向位移梯度,这会破坏血流的正常状态,导致血流出现紊乱或涡流,同时引起WSS和OSI的异常变化,这些现象均被认为与吻合口附近的内膜增生有密切关系^[14]。此外,探究人工血管顺应性对血液流态、WSS、OSI的影响离不开CFD数值模拟。

刘莹等^[15]研究了流固耦合作用下颈动脉内一个心动周期典型时刻血流动力学分布。研究结果表明,低顺应性导致颈动脉血流速度降低,促使血液中

脂质、纤维等大分子在血管壁沉积。同时,WSS的降低还破坏了近壁面血流的正常流态,增强了血小板活性,导致内膜过度增生。He等^[16]利用有限元方法建立了动脉顺应性不匹配的血流动力学模型,考察了动脉顺应性不匹配对血液流态、WSS和血管形状等的影响。研究表明,顺应性不匹配不会改变血液流态,但可能会对WSS产生不利影响。早期的研究采用CFD技术揭示了人工血管顺应性不匹配对血流速度、WSS的影响,但未区分顺应性不匹配的程度。

苏州大学Cao等^[17]以人工血管和宿主血管的吻合体为研究对象,通过改变人工血管顺应性值构建了3种顺应性不匹配程度的血管模型,并针对不同模型进行了数值模拟。图4展示了3种情形(model 1、model 2、model 3分别表示人工血管顺应性低于、近似于、高于宿主血管)下的血管形变及吻合口处的血流异常变化情况,图中红色箭头所示是高不匹配度下吻合口处的血流紊乱和回流现象。

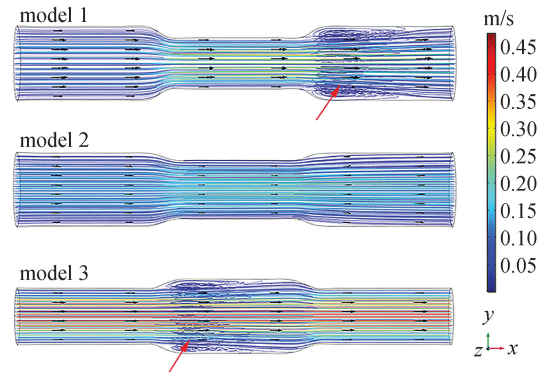


图4 3种不同模型的血流速度流线
Fig. 4 Blood flow velocity streamlines of three different models

Issakhov等^[18]基于流固耦合模拟,分析人工血管顺应性对其弹性和径向扩张位移的影响,并通过血流动力学变化揭示血管顺应性对压力分布、压降和WSS的作用。此外,在狭窄动脉模型中,他们观察到了较低的WSS值和高血流速度梯度,证实了涡流和再循环区域的形成。研究结果为优化人工血管设计提供了理论依据。同时,该团队还分别对健康胸与病变胸的主动脉医学图像进行了流固耦合模拟,探讨了人工血管顺应性、血管弹性与血流的相互作用^[19],发现通过医学图像构建几何模型,能更加真实地反映特定患者体内的人工血管顺应性对血流

动力学的影响。

Girardin 等^[20]对不同顺应性的人工血管与宿主主动脉吻合后的几何模型进行血流动力学模拟,通过计算压力、WSS 和能量损失等指标得出:缩短人工血管长度、提高人工血管与宿主主动脉的顺应性匹配度可改善患者预后。Turner 等^[21]评估了一种组织工程血管和膨体聚四氟乙烯血管的顺应性,研究表明,组织工程血管的顺应性高于膨体聚四氟乙烯人工血管,并通过数值模拟验证了组织工程血管的高顺应性可在移植后改善血流动力学性能。上述研究进一步证实了提升人工血管与宿主血管的顺应性匹配度有助于维持血流动力学稳定。

计算机数值模拟可以直观地显示血液流动和血管变形情况,并给出具体的压力、速度、位移、应力等数值,且不必进行人体或动物试验,尤其是在改变血流条件、血管参数等一系列仿真试验时尤为便捷,可显著节约研究成本,为研究顺应性不匹配对血流动力学的影响提供了高效手段。在该方法的辅助下,上述研究均成功探索了人工血管顺应性与血流变化的相关性,尤其是顺应性不匹配对 WSS、OSI 等血流动力学参数的影响,结果均表明人工血管顺应性过低或与宿主血管高度不匹配时,都会导致血流局部紊乱和形成扰流,进而出现异常 WSS、OSI 值,对血管壁细胞产生一系列影响。

3 人工血管顺应性与内膜增生

人工血管移植后出现的内膜增生(intimal hyperplasia, IH)将会使管腔变狭窄,且随着内膜增厚,其对血管通畅性的影响将越来越严重。这种病变的直接力学诱因是血流动力学因素异常,其根本原因是人工血管与宿主血管的顺应性不匹配。

3.1 内膜增生的力学机制

研究血管在力学环境中对力学信号的感知和响应机制具有重要的意义。IH 是血管重塑的结果,其产生的原因涉及内皮细胞功能紊乱、炎症反应以及平滑肌细胞(VSMCs)的增殖和迁移等^[22]。如图 5 所示^[23]:由于血流速度降低而导致的低血管壁面剪切应力会增加内皮细胞层上炎症细胞的黏附(如血小板和白细胞),它们可能被激活并触发血栓和 IH 的形成;而高剪切应力会通过激活细胞内信号通路

(如 PI3K/Akt 和 Ras-MAPK),促进血管内皮细胞和平滑肌细胞的增殖。然而,长期的高剪切应力可能导致细胞增殖过度而形成 IH。

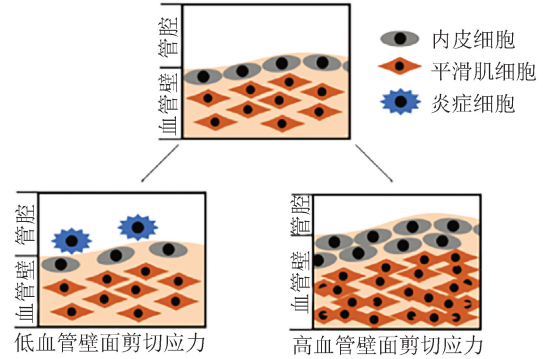


图 5 血管壁面剪切应力的变化而导致的血管壁重塑
Fig. 5 Vascular vessel wall remodelling due to alteration in wall shear stress

Post 等^[24]研究发现,力学因素诱导血管重建时,VSMCs 会向内层迁移并导致血管壁增厚。此过程中 VSMCs 由收缩型向合成型转变,并伴随细胞内蛋白表达量的变化。即收缩型 VSMCs 中相应蛋白(如 α -肌动蛋白)表达降低、合成型 VSMCs 中基质金属蛋白酶(如 MMP-1、MMP-2 和 MMP-9)表达升高,这种变化是内膜增生发生的早期标志性事件。试验结果表明,血管培养的第 7 天,早期标志物出现明显变化,并随时间增加内膜增生现象逐渐显著。这对通过体外血管培养试验来检测是否产生内膜增生,具有重要指导意义。

3.2 顺应性不匹配对内膜增生的影响

试验和临床均已证实,人工血管与宿主血管顺应性不匹配会导致严重的术后并发症,如血栓和内膜增生等,进而影响血管的通畅性。Yao 等^[25]将不同顺应性的人工血管与兔子颈动脉进行吻合。结果表明,人工血管顺应性与兔子颈动脉接近时,吻合口处内膜增生风险低,移植术后血管整体通畅性较高。这进一步证实了人工血管顺应性与宿主血管不匹配对内膜增生的发生具有显著的影响,且二者顺应性不匹配程度越大,内膜增生的风险越高,远期通畅率越低。

吻合口及缝合线附近易发生内膜增生。Jayendiran 等^[26]针对吻合口处的应力问题展开研究,建立了波纹涤纶管移植与主动脉端-端吻合模型。研究表明,人工血管与宿主血管顺应性不匹配

会导致吻合口处应力集中,其根本原因在于两者存在径向位移梯度差。

此外,也有学者就相关血流动力学进行研究。Jeong 等^[23]指出,血流动力学的异常变化是内膜增生的力学诱因,而血流动力学的异常变化主要受人工血管与宿主血管顺应性不匹配的影响;同时也证实了低血管壁面剪切应力不仅会导致血管管腔内血流速度减缓、抑制内皮细胞增殖并促进其形态改变,还会显著增加内皮细胞层上的单核细胞黏附,进而导致 IH 的出现。Sho 等^[27]研究发现,内膜增厚与局部低血管壁面剪切应力水平有关,当血管壁面剪切应力长期低于 0.5 Pa 时,便会诱发内膜增生。Kim 等^[28]的研究进一步证实了顺应性不匹配、血流动力学异常与内膜增生三者之间的内在联系。他们以聚四氟乙烯 (PTFE) 人工血管为移植物,通过稳态流动的数值模拟发现,由于顺应性不匹配,血流从 PTFE 人工血管流向模拟动脉时,吻合口处的 WSS 偏低,而体外试验则发现低 WSS 区域有新生内膜纤维增生,由此证明了三者之间的相关性。

综上所述,人工血管与宿主血管顺应性不匹配易导致内膜增生,且二者不匹配程度越大,内膜增生风险越高。其机制为顺应性不匹配会造成血流动力学异常(如局部血流紊乱、WSS 过低等),进而引起血管平滑肌细胞迁移等生物学响应,最终导致内膜增生。

4 基于改善血管顺应性抑制内膜增生的措施

4.1 药物干预

部分学者从药物干预的角度进行相关研究以抑制内膜增生。Yang 等^[29]研究了新型小口径组织工程血管的制备,及其加载雷帕霉素后对内膜增生的抑制作用和机制。Wang 等^[30]与 Zhang 等^[31]研究了一氧化氮 (nitric oxide, NO) 信号分子与内膜增生之间的关联,以期通过 NO 的作用提高血管的长期通畅性。虽然药物干预可对内膜增生产生一定的抑制效果,但该方法未从根本上解决内膜增生的诱因。

4.2 人工血管形状设计

从血管形状可改变血流动力学的角度出发,改变人工血管形状,将可能降低内膜增生的风险。Liu

等^[32-33]研究了血管内旋动流的作用和意义,发现能产生旋动流的血管可以产生更高的壁面剪切速率,进而可减小搭桥血管和吻合处的血流扰动,降低旋动流附近的振荡剪切指数,减少因异常血流而导致的血栓和内膜增生。

李田华等^[34-35]构建了螺旋型人工血管与宿主血管的端侧吻合模型,通过有限元数值模拟证实了血管内旋动流的形成,并探讨了吻合角、螺旋半径、螺距等参数对吻合口处(即易发内膜增生部位)WSS 的影响。将螺旋型血管模型与平直型血管模型进行对比(图 6)^[35],结果表明螺旋型血管有利于提高血流速度和 WSS。

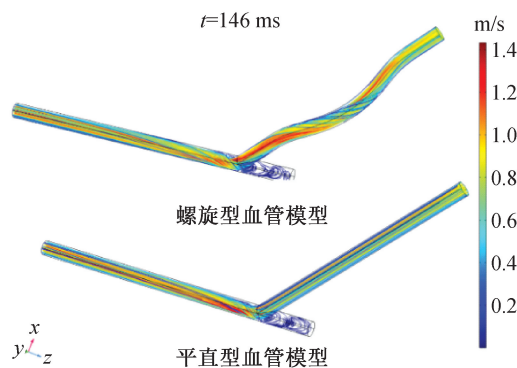


图 6 血管内流线示意

Fig. 6 Illustration of intravascular streamlines

Jiang 等^[12]基于低顺应性人工血管径向位移低于宿主血管的现象,提出了中凸型人工血管的设计理念 and 顺应性不匹配度的概念,并通过数值模拟证明了中凸型人工血管可降低顺应性不匹配度、改善异常血流,并探索了其制备方法。中凸型血管的成功研发为设计开发能降低内膜增生风险的人工血管提供了新思路。

国外研究者在旋动流方面的研究表明:平衡血管壁面剪切应力的不对称分布,降低振荡剪切指数和流动分离的大小,减少再循环流动,对抑制血栓形成和内膜增生具有积极意义^[36]。

4.3 人工血管顺应性的提高

鉴于大多数人工血管顺应性低于宿主血管的现状,降低二者的顺应性不匹配度,最直接的方法就是提高人工血管的顺应性。Zhang 等^[37]研制了一种 3 层结构的高顺应性聚氨酯人工血管。他们认为,较高顺应性的人工血管有望比传统的聚酯和膨体 PTFE [顺应性在 1%~2%/(100 mmHg)] 人工血管具

备更好的通畅性。Guan 等^[38]采用浸涂和静电纺丝相结合的方法制备了双层人工血管,并通过改变内层浸涂层和外层静电纺丝层的厚度比实现了人工血管顺应性的可调控。他们用聚氨酯材料制备的人工血管顺应性在 10%/(100 mmHg)左右。

Rovas 等^[39]将织物结构的人工血管与 Z 型金属支架(模仿弹性蛋白纤维)复合在一起,设计了一种复合型人工血管,并运用有限元分析优化了支架的形状,实现了理论上可达到了人健康主动脉的顺应性。后来,他们通过猪胸主动脉的替换试验证明了该人工血管可减少顺应性不匹配所带来的并发症^[40]。Fazal 等^[41]以明胶-甲基丙烯酸为原料并采用 3D 打印法制备血管内层,以聚己内酯为原料并采用静电纺丝法制备血管外层。所得复合型人工血管的顺应性达到人的肌动脉和弹性动脉的水平。

综上所述,随着人工血管材料和成型技术的发展,国内外在研究制备高顺应性人工血管方面都取得了明显的成效,但其临床应用还需一系列验证和评估。人工血管顺应性并非越高越好,当人工血管与宿主血管顺应性匹配时,效果最佳。在人工血管中还有一类组织工程血管^[42],其利用生物可降解材料和血管壁正常细胞,通过组织工程技术构建,优点是具有可调节性,能使顺应性更接近宿主血管。Furdella 等^[43]研究表明,以宿主血管的顺应性为目标,先基于有限元法通过计算机程序对人工血管的厚度、原材料配比等参数进行优化设计,再进行人工血管的制备和组织工程培养,可获得与宿主血管顺应性相匹配的组织工程化人工血管。然而,组织工程技术涉及人工血管基体的降解和细胞组织生长的协同作用,制备过程复杂、耗时,真正用于临床还面临诸多挑战,期望未来取得新的突破。

5 总结与展望

多年来,研究者们致力于人工血管顺应性的测试与提高,也通过试验和理论研究证实了人工血管顺应性不匹配所引起的异常血流变化并最终导致内膜增生的事实。然而,人体不同部位的血管在管径、壁厚及力学性能等方面存在差异,人工血管的制备难以达到个性化匹配效果。组织工程

血管虽然是一类非常接近宿主血管的移植物,但还存在诸多挑战,其制备工艺成本高昂。因此,人工血管与宿主血管顺应性不匹配的问题在短期内难以解决,如何在此前提下降低顺应性不匹配所带来的不利影响,是值得研究的课题。

目前,人工血管在临床应用前尚无顺应性筛选的方法,人工血管与宿主血管的顺应性不匹配度也无统一的评价和控制标准,这加大了异常血流动力学因素和内膜增生的风险。实际上,顺应性不匹配程度影响着吻合口处血管径向位移梯度和血流状态变化,进而影响内膜增生的风险。因此,人工血管顺应性并非越高越好,将二者的不匹配程度控制在合理范围将有利于降低内膜增生的风险。而实现上述目的关键在于建立顺应性不匹配度与内膜增生的量化关系。

鉴于当前单一研究方法的局限性,无论是体内还是体外研究,都没有完全解决顺应性不匹配与内膜增生的量化关系问题。在未来的研究中,可采用数值模拟与体内、外试验相结合的综合化试验方案,研究顺应性不匹配对内膜增生的影响,并进行更具体化和量化的分析,然后在此基础上建立人工血管顺应性的筛选标准和方法。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 盛百合,张馨予,杨洪喜,等. 中国居民 1990—2019 年心血管疾病和慢性呼吸系统疾病负担变化趋势及预测分析[J]. 中国公共卫生, 2024, 40(4): 477-483.
- [2] 刘雪莹,邹婷,王璐. 纤维原料对机织人工血管织物结构和力学性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(10): 1-11.
- [3] LEMSON M S, TORDOIR J H M, DAEMEN M J A P, et al. Intimal hyperplasia in vascular grafts [J]. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2000, 19(4): 336-350.
- [4] 管立桦. 顺应性可控的小口径人工血管的制备及其性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- [5] 杜令洋. 人造血管体外顺应性仿真测试仪器的改进

- 及其实验研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- [6] 赵荟菁, 吕强, 王璐. 一种人工血管的生物力学性能测试装置: CN201220256386.9[P]. 2013-03-20.
- [7] 赵荟菁, 伊光辉, 孟凯. 人工血管顺应性测试装置: CN202111275539.4[P]. 2023-08-22.
- [8] LUCEREAU B, KOFFHI F, LEJAY A, et al. Compliance of textile vascular prostheses is a fleeting reality [J]. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2020, 60(5): 773-779.
- [9] LUCCA A, BUSTO S, MÜLLER L O, et al. A semi-implicit finite volume scheme for blood flow in elastic and viscoelastic vessels [J]. Journal of Computational Physics, 2023, 495: 112530.
- [10] ZAHEDMANESH H, MACKLE J N, SELLBORN A, et al. Bacterial cellulose as a potential vascular graft: mechanical characterization and constitutive model development [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2011, 97(1): 105-113.
- [11] 曹婷. 人工血管与宿主血管顺应性不匹配的数值模拟研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [12] JIANG Z Y, ZHAO H J, ZHANG K Q, et al. Simulation and preparation of novel medium convex artificial blood vessel for reducing compliance mismatch [J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2023, 18: 100246.
- [13] 宋雨杰. 主动脉血管医学建模及血流动力学数值模拟[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2019.
- [14] SELVARASU N K C, TAFTI D K, VLACHOS P P. Hydrodynamic effects of compliance mismatch in stented arteries [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2011, 133(2): 021008.
- [15] 刘莹, 章德发, 殷艳飞, 等. 颈动脉双向流固耦合模型非稳态血流数值分析 [J]. 介入放射学杂志, 2015, 24(10): 885-889.
- [16] HE F, HUA L, GAO L J. A computational model for biomechanical effects of arterial compliance mismatch [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2015, 2015(1): 213236.
- [17] CAO T, JIANG Z Y, ZHAO H J, et al. Numerical simulation to study the impact of compliance mismatch between artificial and host blood vessel on hemodynamics [J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2022, 15: 100152.
- [18] ISSAKHOV A, SABYRKULOVA A, ABYLKASSYMOVA A. Numerical modeling of the fluid-structure interaction during blood flow in a flexible stenotic aorta [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 158: 107857.
- [19] ISSAKHOV A, SABYRKULOVA A, ABYLKASSYMOVA A. The fluid-structure interaction during blood flow in a flexible stenotic thoracic aorta: numerical study [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2024, 165: 39-51.
- [20] GIRARDIN L, STOKES C, THET M S, et al. Patient-specific haemodynamic analysis of virtual grafting strategies in type-B aortic dissection: impact of compliance mismatch [J]. Cardiovascular Engineering and Technology, 2024, 15(3): 290-304.
- [21] TURNER M E, BLUM K M, WATANABE T, et al. Tissue engineered vascular grafts are resistant to the formation of dystrophic calcification [J]. Nature Communications, 2024, 15: 2187.
- [22] ZHANG B C, ZHU W Y, WANG S N, et al. Colchicine reduces neointima formation and VSMC phenotype transition by modulating SRF-MYOC activation and autophagy [J]. Acta Pharmacologica Sinica, 2025, 46(4): 951-963.
- [23] JEONG Y, YAO Y, YIM E K F. Current understanding of intimal hyperplasia and effect of compliance in synthetic small diameter vascular grafts [J]. Biomaterials Science, 2020, 8(16): 4383-4395.
- [24] POST A, DIAZ-RODRIGUEZ P, BALOUCH B, et al. Elucidating the role of graft compliance mismatch on intimal hyperplasia using an *ex vivo* organ culture model [J]. Acta Biomaterialia, 2019, 89: 84-94.
- [25] YAO Y, POHAN G, CUTIONGCO M F A, et al. *In vivo* evaluation of compliance mismatch on intimal hyperplasia formation in small diameter vascular grafts [J]. Biomaterials Science, 2023, 11(9): 3297-3307.
- [26] JAYENDIRAN R, NOUR B, RUI MI A. A fluid-structure interaction analysis of anisotropic dacron fabric used for aortic replacement [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 97: 103108.
- [27] SHO E, NANJO H, SHO M, et al. Arterial enlargement, tortuosity, and intimal thickening in response to sequential exposure to high and low wall shear stress [J]. Journal of Vascular Surgery, 2004, 39(3): 601-612.
- [28] KIM Y H, CHANDRAN K B. Steady flow analysis in

- the vicinity of an end-to-end anastomosis [J]. *Biorheology*, 1993, 30(2): 117-130.
- [29] YANG Y, LEI D, ZOU H X, et al. Hybrid electrospun rapamycin-loaded small-diameter decellularized vascular grafts effectively inhibit intimal hyperplasia [J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 97: 321-332.
- [30] WANG Z H, LI M Y, WANG B, et al. Biomimetic niche of vascular intima with biophysical orientation and biochemical stimulation for rapid endothelialization and long-term patency [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138805.
- [31] ZHANG X Y, WANG Y B, LIU J, et al. A metal-organic-framework incorporated vascular graft for sustained nitric oxide generation and long-term vascular patency [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 421: 129577.
- [32] LIU X, SUN A Q, FAN Y B, et al. Physiological significance of helical flow in the arterial system and its potential clinical applications [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2015, 43(1): 3-15.
- [33] LIU X, WANG L B, WANG Z Z, et al. Bioinspired helical graft with taper to enhance helical flow [J]. *Journal of Biomechanics*, 2016, 49(15): 3643-3650.
- [34] 李田华, 李晶晶, 张克勤, 等. 螺旋型人工血管内的血流动力学数值模拟 [J]. *纺织学报*, 2022, 43(3): 17-23.
- [35] 李田华. 螺旋型人工血管的血流动力学数值模拟及制备 [D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [36] HA H, CHOI W, LEE S J. Beneficial fluid-dynamic features of pulsatile swirling flow in 45° end-to-side anastomosis [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2015, 37(3): 272-279.
- [37] ZHANG B C, XU Y, MA S T, et al. Small-diameter polyurethane vascular graft with high strength and excellent compliance [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2021, 121: 104614.
- [38] GUAN L H, ZHAO H J, WANG K, et al. PLCL-TPU bi-layered artificial blood vessel with compliance matching to host vessel [J]. *Journal of Biomaterials Applications*, 2023, 38(2): 194-202.
- [39] ROVAS G, BIKIA V, STERGIOPULOS N. Design and computational optimization of compliance-matching aortic grafts [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023, 11: 1179174.
- [40] ROVAS G, REYMOND P, VAN STEENBERGHE M, et al. Evaluation of a novel compliance-matching aortic graft in a swine model [J]. *Journal of Biomechanics*, 2025, 183: 112629.
- [41] FAZAL F, MELCHELS F P W, MCCORMACK A, et al. Fabrication of a compliant vascular graft using extrusion printing and electrospinning technique [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(23): 2400224.
- [42] PASHNEH-TALA S, MACNEIL S, CLAEYSSSENS F. The tissue-engineered vascular graft-past, present, and future [J]. *Tissue Engineering Part B, Reviews*, 2016, 22(1): 68-100.
- [43] FURDELLA K J, HIGUCHI S, BEHRANGZADE A, et al. *In-vivo* assessment of a tissue engineered vascular graft computationally optimized for target vessel compliance [J]. *Acta Biomaterialia*, 2021, 123: 298-311.

加强道德养成 培养法治精神