

文章编号: 1004-7220(2022)03-0403-07

远端侧-侧吻合冠脉搭桥术后血栓形成的数值模拟

付文字^{1,2}, 乔爱科³

(1.北京联合大学 机器人学院, 北京 100027; 2.北京市智能机械创新设计服务工程技术研究中心, 北京 100020;
3.北京工业大学 环境与生命学部, 北京 100124)

摘要:目的 研究桥血管远端不同处理方式对其血栓生成的不同影响。方法 针对远端侧-侧吻合(distal-end side-side anastomosis, DESSA)冠脉搭桥术,构建桥血管远端裁剪和不裁剪两种模型。使用生化反应的血液物质传输扩散模型,同时考虑血流动力学的切变率、流体滞留时间和血小板分布参数,评估血栓形成的可能性,使用数值模拟方法探讨 DESSA 冠脉搭桥中血栓生长。结果 对于桥血管远端无裁剪处理的模型,血栓首先在桥血管远端内壁上形成,随后向其内部生长,直至血栓占满大部分桥血管远端区域,血栓进入稳定状态,体积不再变化,生成血栓体积为 15.051 mm³。对于桥血管远端裁剪处理模型,生成血栓体积为 7.352 mm³,同远端无裁剪模型相比,生成血栓体积减小 51.2%。桥血管远端裁剪处理后,吻合口上方桥血管内壁上有血栓生成,壁厚约为 0.16 mm,为桥血管半径的 10.65%。上述两种术式中,桥血管远端区域形成多个漩涡流(流速小于 10 mm/s),促进桥血管远端血栓形成;计算结果和临床报道的血栓形成区域相一致。结论 临床 DESSA 冠脉搭桥术时,对桥血管远端进行裁剪处理,减小了桥血管生成血栓体积,但吻合口上方桥血管壁面生成血栓对冠脉搭桥术后影响还需进一步研究。

关键词: 血栓; 远端侧-侧吻合; 标量对流扩散; 计算流体力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.004

Numerical Simulation of Thrombus Formation after Artery Bypass Grafting with Distal-End Side-to-Side Anastomosis

FU Wenyu^{1,2}, QIAO Aike³

(1. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100027, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Smart Mechanical Innovation Design Service, Beijing 100020, China; 3. Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Objective To study the difference in thrombus formation at distal end of the graft with two different treatments. **Methods** For coronary artery bypass grafting with distal-end side-to-side anastomosis (DESSA), two models with or without distal end trimming of the graft were established. Using the blood substance transport and diffusion model considering biochemical reactions, combined with hemodynamics parameters of shear rate, fluid residence time, and platelet distribution, the possibility of thrombus formation was evaluated. Numerical simulation method was used to investigate thrombus growth in coronary artery bypass grafting with DESSA. **Results** For the model without distal end trimming of the graft, the thrombus was first formed on inner wall at distal end of the graft, and then grew inward until the thrombus occupied most of the graft region at distal end, which indicated that thrombus formation was in a stable state, and the volume of the thrombus didn't change, the final volume of the thrombus was 15.05 mm³. For the model with distal end trimming of the graft, the final volume of the thrombus was 7.35 mm³, which was 51.2% smaller than that of the model without distal end

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-08-30

基金项目: 北京联合大学百杰计划(BPHR2018CZ06), 北京市教委-市自然科学基金联合项目(KZ202110005004)

通信作者: 乔爱科, 教授, E-mail: qak@bjut.edu.cn

trimming of the graft. Thrombus was formed on inner wall of the graft above the anastomosis for the model with distal end trimming of the graft, and the wall thickness was about 0.16 mm, which was 10.65% of the graft radius (1.50 mm). In the above two procedures, multiple vortices (blood flow velocity less than 10 mm/s) were formed in distal region of the graft, which further promoted thrombus formation at distal end of the graft. The area of thrombus formation obtained from numerical simulation was consistent with clinical investigation. **Conclusions** For clinical coronary artery bypass grafting with DESSA, the volume of the generated thrombus can be reduced for the model with distal end trimming of the graft. However, the effect of thrombus formation on inner wall of the graft above the anastomosis on coronary artery bypass grafting needs further study.

Key words: thrombosis; distal-end side-to-side anastomosis (DESSA); scalar advection diffusion; computational fluid dynamics

近年来,以大隐静脉作为移植物,采用远端侧-侧吻合(distal-end side-side anastomosis, DESSA)方式进行冠脉搭桥术逐渐增多。DESSA具有以下优点:①大隐静脉和冠脉有较大的直径比,可以相同的吻合口尺寸进行缝合^[1-2];②桥血管和冠脉接口尺寸匹配,吻合口周围不容易出血;③两者在同一平面内进行搭桥术,吻合口不容易发生扭结弯曲等变形;④术后需进行检查时,可将远端桥血管切开展取出手术夹后进行检查。当然,同端-侧吻合方式相比,DESSA冠脉搭桥术后会在大隐静脉远端形成血栓。为避免血栓脱落引发血管栓塞,日本医生建议夹闭大隐静脉远端时尽可能靠近吻合口^[3]。中国医生建议距吻合口足尖2~3 mm位置以大约45°角方向将超出吻合口的大隐静脉截掉^[4]。以上建议均基于临床经验,无理论依据。目前,针对DESSA桥血管血栓形成的数值模拟研究还鲜有报道。

本文将血流动力学模型与考虑了生化反应的血液物质传输扩散模型相结合,对桥血管DESSA血栓形成进行数值模拟研究。首先,对使用的血栓预测模型进行实验验证,以保证使用血栓预测模型的可靠性;随后,使用SolidWorks进行模型构建,得到DESSA冠脉搭桥几何模型,开展血流动力学数值模拟,获得冠脉搭桥术后的血流动力学参数;最后,基于血栓预测模型对桥血管DESSA方式血栓形成情况进行预测。研究结果可为DESSA冠脉搭桥术桥血管远端的处置方式提供理论指导。

1 方法

1.1 几何模型

计算方法验证部分使用经典台阶(backward-

facing step, BFS)模型^[5]。DESSA冠脉搭桥几何模型如图1(a)所示,桥血管和冠脉直径分别为3、1.5 mm,吻合角为30°(桥血管近端部分中心线和冠脉中心线之间夹角),吻合口长度(沿冠脉中心线方向)为3 mm。从冠脉搭桥术后的统计结果看,50%患者术后10年桥血管再次狭窄^[6]。有医生建议将桥血管远端区域尽可能多得截掉^[3-4],但裁剪位置距离吻合口有一最短距离(一般为2~3 mm),显然不能将桥血管远端区域全部截掉。这自然就出现将桥血管远端截掉部分区域后是否能避免桥血管远端产生血栓的问题。为此,将图1(a)模型进行修改,获得图1(b)所示裁剪桥血管远端冠脉搭桥模型。56°为裁剪角度(桥血管远端距离吻合口2 mm处A点与足尖C的连线AC同线段AB的夹角为裁剪角)。图1中尺寸均为大隐静脉与后降支冠脉DESSA时的典型尺寸。

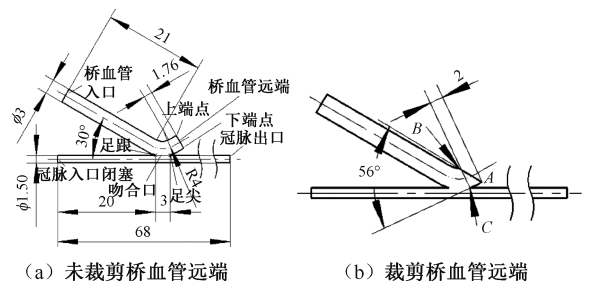


图1 DESSA冠脉搭桥几何模型

Fig.1 Geometrical model of DESSA bypass (a) Without distal end trimming of the graft, (b) With distal end trimming of the graft

1.2 计算模型

本文使用Menichini等^[7]发展的血栓预测模型。血液为不可压缩非牛顿流体,在BFS以及

DESSA 冠脉搭桥模型中均使用红细胞压积为 30% 的 Quemada 模型表示血液的非牛顿流体剪切流动行为^[8]。设置血管壁为刚性。引入静止血小板 (resting platelets, RP)、活化血小板 (activated platelets, AP)、凝血剂 (coagulant, C)、结合血小板 (bound platelets, BP) 等血液物质表示血栓形成过程,同时考虑了以上成分及生成血栓对血液流动的影响。血栓形成是涉及大量复杂生物化学反应及血液物质运输的生物力学过程。开始 C 在低剪切区血管内壁上形成;当 C、AP 和停滞时间 (residence time, RT) 足够大时, BP 形成并激活凝血因子的反馈机制,进一步促进凝血因子形成。当 BP 浓度超过一定阈值,血栓开始形成。虽然血液中蛋白质和凝血因子在血管中心区域以对流传输为主,但在近管壁区域及血流低速和粒子高停滞时间区域中,凝血因子以扩散传输为主。由于血栓生成和其形成过程中的生化反应所需时间有数量级的差别,为使模拟血栓形成的计算切实可行,模拟计算时分别考虑了对流主导的流动和以扩散为主的血栓表面的生化反应,即通过对 C 剪切依赖的扩散机制的传输建模来实现的。在初始形成血栓表面, C 的扩散传输,进而 BP 形成、浓度增加表示血栓的生长。血栓形成调节反馈路径如图 2 所示^[7]。

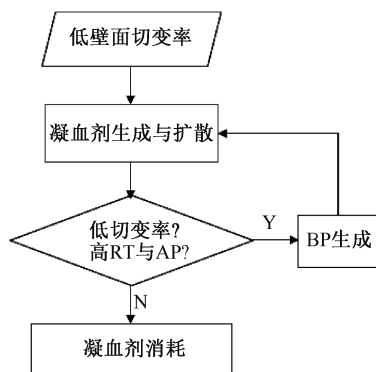


图 2 血栓形成的反馈调节流程图

Fig.2 Flow chart of thrombus formation with feedback regulation

1.3 网格模型

在 ANSYS ICEM CFD 14.5 中进行网格划分,类型为非结构化四面体加三棱柱的混合网格。由于血管壁面附近的流动状态和血栓生成密切相关,在血管壁面的法向采用逐渐加密的三棱柱网格。为

减小网格数量对计算精度的影响,通过 3 次尝试逐渐加大网格数量 (网格数量分别为 842 756、2 676 718、5 335 296),然后计算同一位置点的壁面剪应力并进行对比;当前后模拟计算的壁面剪应力相对误差小于 5% 后,就认为网格精度已满足要求。以第 3 次网格数量的参数设置进行网格划分,边界层初始层厚为 15 μm ,共 10 层,各层层厚以 1.05 倍的生长因子增长。

1.4 数值计算方法

用于实验验证的 BFS 模型,血流以 0.76 L/min 不变流量流入,出口以 0 Pa 作为边界条件。首先,进行 3 个心动周期 (心动周期为 1 s) 的无血栓预测模型的血液流动计算,模拟血管内的血液流动环境;再进行血栓预测模型的计算 (以先进行计算的最后时刻结果作为初始条件)。计算工具使用 ANSYS CFX 14.5,总计算时间为 50 s,时间步长为 10 ms^[7]。

DESSA 搭桥模型入口速度曲线如图 3 所示^[9-10]。此速度下,1 min 内血液入口流量为 30 mL;出口处压力设置为 0 Pa。同 BFS 模型计算类似,先进行 3 个周期 (心动周期为 0.9 s) 的血液流动计算,营造出血管内的血液流动环境。然后使用血栓预测模型进行计算。经多次尝试计算,确定计算总时间为 18.9 s (生成血栓已稳定)。18.9 s 的计算时间由血栓形成前的血液流动环境计算时间 (2.7 s) 及血栓形成的计算时间 (16.2 s) 组成。时间步长为 10 ms,以血栓生成过程中的典型时刻计算结果进行血液物质和流场参数分析。无论桥血管远端未裁剪模型还是远端裁剪模型,所使用的计算方法、参数以及边界条件均相同。

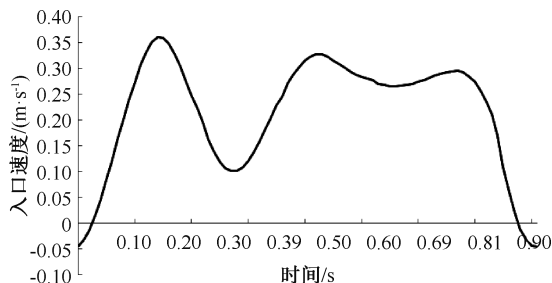


图 3 DESSA 搭桥模型入口速度

Fig.3 Pulsatile blood-flow waveform used in DESSA bypass model

2 结果

2.1 实验验证

BFS模型中血栓从出现、发展至最大的分布情况如图4所示。当BP浓度大于200 nmol/L时,则判定血栓形成^[7]。血栓开始出现在台阶下部顶点附近,并沿径向和轴向两个方向增长。血栓高度长

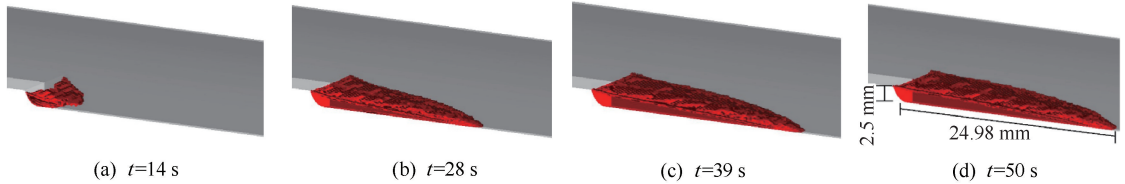


图4 预测的BFS模型血栓形成情况

Fig.4 Predicted thrombus formation in BFS model

(a) $t=14$ s, (b) $t=28$ s, (c) $t=39$ s, (d) $t=50$ s

2.2 血栓形成前血液流动

对于桥血管远端无裁剪模型, $t=0.1$ s时,桥血管入口速度为0.246 m/s。当血液从桥血管近端入口流入时,在桥血管远端区域形成了1个逆时针旋向的涡流,且流速小于60 mm/s。在吻合口足尖附近冠脉血管内也形成了1个逆时针旋向涡流,且流速大于60 mm/s。在心动周期末期,血液从桥血管入口流出时,血管内流动情况较为复杂[见图5(a)]。原来有的桥血管远端区域内的涡流继续存在,旋向未变,但血流速度更小($v<30$ mm/s)。在桥血管远端上下两 endpoint 附近,各有1个顺时针旋

至2.5 mm,同时宽度为8.66 mm时($t=28$ s时血栓基本为此状态),血栓沿径向不再增长;随着时间推移,血栓沿轴向继续增长,长度为24.98 mm后不再增长。根据Taylor等^[5]的实验,血栓生长的最大长度为24.6 mm。本文模拟结果较好复现了Taylor等^[5]实验,为该血栓模型的拓展应用奠定了基础。

向的涡流,这两个涡流面积小,流速小于10 mm/s。计算可知,血栓就是从这两个位置开始形成。在足尖右下方冠脉血管内,形成了1个逆时针旋向的涡流,且流速更低($v<10$ mm/s)。

对于桥血管远端裁剪模型, $t=0.1$ s时,在桥血管远端右下角很小区域范围内形成了1个流速很低的涡流。在吻合口足跟正下方冠脉血管内也形成了1个逆时针旋向涡流。在心动周期的末期,在吻合口足尖上方偏右桥血管远端裁剪后剩余的区域内有1个顺时针旋向的涡流,流速小于10 mm/s [见图5(b)]。

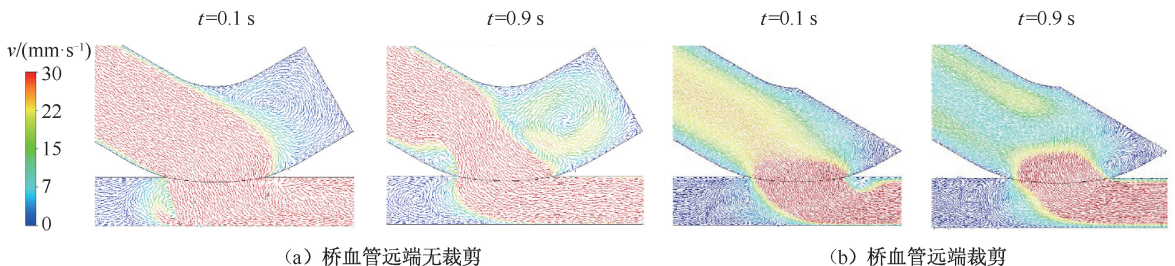


图5 DESSA模型对称平面内血流速度

Fig.5 Blood flow velocity in the symmetric plane of DESSA model (a) Without distal end trimming of the graft, (b) With distal end trimming of the graft

2.3 DESSA冠脉搭桥血栓形成预测

桥血管远端无裁剪模型血栓形成过程如图6(a)所示(为显示内部血栓生成情况,以对称平面作为对称面显示了50%模型)。血栓在 $t_1=5.4$ s

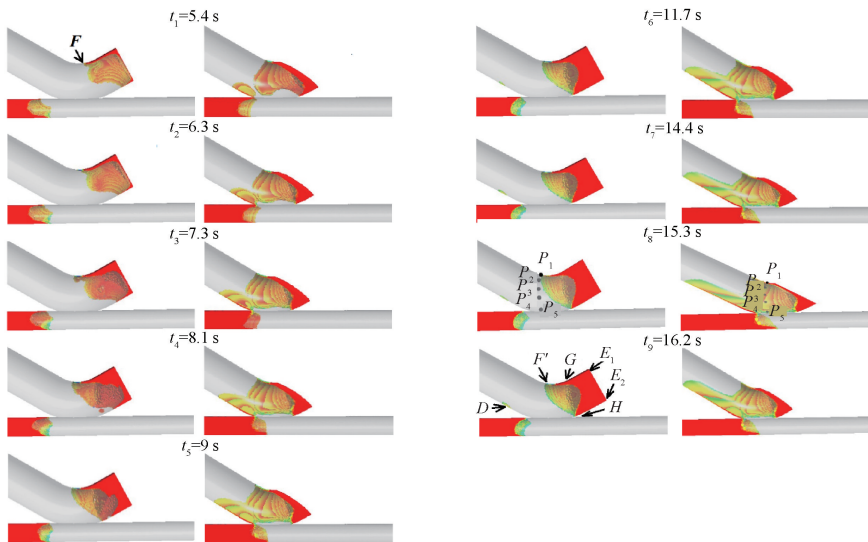
(第6个心动周期)已经开始出现,血栓覆盖除了桥血管远端左下角部分外的区域,并且血栓在桥血管远端上下 endpoint 附近厚度相对较大。

随着时间的推移,血栓不断从内壁面向血管中

心部位生长,并且上半部分和桥血管远端端面部分增长较快。同时,血栓沿着内壁面从桥血管远端向近端也有增长。 t_1 时刻 F 点(轴对称平面内桥血管远端血栓最左位置点)距离 t_0 时刻 F' 点(轴对称平面内桥血管远端血栓最左位置点)沿冠脉轴线方向距离为 0.83 mm。到 $t_0 = 16.2$ s(并非血栓生成的实际时间,而是计算时间)时,血栓覆盖了多半部分桥血管远端区域(吻合口足尖以上部分区域,心部呈内凹形状;但 $F'GH$ (G 点为桥血管远端上部生成血栓的第 9 层边界层网格与轴对称平面最左侧交点, H 点为轴对称平面内桥血管远端下部血栓距离足尖最近点)3 点所围成区域血栓仅覆盖血管内壁,不再增长;另外值得关注的是, t_0 时刻图中 D 点处箭头所指位置有一面积很小的血栓。从

图 6(a)还可明显看出,在冠状动脉近端区域(吻合口足跟左侧部分)均为血栓所覆盖(在 $t_1 = 5.4$ s 之前就已经形成)。随着时间的推移,这部分的血栓逐渐向吻合口足跟部分推进,但始终没有越过足跟位置。在 $t_0 = 16.2$ s 时,血栓最左侧边缘点距离吻合口足跟为 0.6 mm。经计算,在 t_0 时刻生成的稳定状态的血栓体积为 15.05 mm^3 。

对桥血管远端裁剪模型进行类似计算,模型对称面内的血栓形成情况如图 6(b)所示。对比发现,在桥血管远端裁减模型中,桥血管远端区域血栓明显减小,但在桥血管远端右下角存在一个血栓区域,并沿端面向上延伸(宽度逐渐减小)。经计算,此模型中桥血管远端血栓区域体积为 7.35 mm^3 。



(a) 桥血管远端无裁剪 (b) 桥血管远端裁剪

(a) 桥血管远端无裁剪 (b) 桥血管远端裁剪

图 6 DESSA 模型中血栓随时间增长

Fig.6 Thrombus growth over time of DESSA model (a) Without distal end trimming of the graft, (b) With distal end trimming of the graft

注:彩色表示形成的血栓区域,灰色表示无血栓区域,红色区域 BP 浓度最大。

由于 RT 和壁面切变率(γ)同血栓的生成密切相关,提取未裁剪模型桥血管远端壁面上 F' 、 E_1 、 E_2 、 H 、 D 5 点的 RT 和 γ ,点 E_1 、 E_2 为轴对称平面内桥血管远端血栓上、下部最右位置点[见图 6(a) t_0 时刻],表 1 列出了具体数据。

桥血管远端裁剪模型吻合口上方壁面有血栓生成,而远端未裁剪模型相应位置没有血栓生成。主要原因是将桥血管远端截掉一部分区域后,由于

血管几何结构的变化,导致桥血管远端区域血流特性发生变化。特别是这部分区域的 γ 有较大变化。为了具体说明这些变化,在桥血管吻合口上方壁面取 5 点(见图 6 中 t_8 时刻 $P_1 \sim P_5$ 点,两个模型 5 点位置相同,未裁剪模型 5 点处没有生成血栓,而裁剪模型这 5 点位置处有血栓生成),然后提取这些点的 γ 和 RT,结果见表 2。

表 1 桥血管远端壁面 5 点滞留时间和壁面切变率

Tab.1 RT and wall shear strain of 5 points on distal wall of graft vessel

计算时刻/s	RT/s					$\gamma/(s^{-1})$				
	F'	E_1	E_2	H	D	F'	E_1	E_2	H	D
5.4	3.27	8.18	8.18	5.65	6.70	57.98	0.0017	0.0016	8.99	16.30
6.3	3.11	9.08	9.08	6.49	7.18	51.41	0.0018	0.0017	10.14	15.85
7.3	3.23	10.08	10.08	7.41	7.63	46.05	0.0019	0.0018	11.18	15.45
8.1	3.16	10.88	10.88	8.13	7.94	42.83	0.0020	0.0019	12.35	15.33
9.0	3.11	11.78	11.78	8.99	8.34	39.87	0.0021	0.0020	13.36	15.14
11.7	3.18	14.48	14.48	11.76	9.34	33.95	0.0024	0.0021	15.89	14.79
14.4	3.32	17.18	17.18	14.61	10.04	30.41	0.0026	0.0023	18.28	14.57
15.3	3.16	18.08	18.08	15.55	10.23	29.55	0.0026	0.0023	19.04	14.53
16.2	3.10	18.98	18.98	16.50	10.40	28.81	0.0027	0.0024	19.77	14.50

表 2 桥血管吻合口上方壁面 5 点滞留时间和壁面切变率

Tab.2 RT and wall shear strain of 5 points on the wall above the anastomosis of the graft vessel

计算时刻/s	远端未裁剪桥血管										远端裁剪桥血管									
	RT/s					$\gamma/(s^{-1})$					RT/s					$\gamma/(s^{-1})$				
s	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
5.4	5.61	4.12	3.41	2.23	0.85	53.27	98.39	255.13	735.14	4146.32	8.00	7.62	7.95	8.02	7.79	22.47	22.56	15.20	13.01	34.83
6.3	6.03	4.31	3.86	2.26	0.82	47.63	86.32	221.02	770.30	4173.59	8.70	8.02	8.59	8.71	8.48	25.06	24.68	17.59	15.35	38.17
7.3	6.33	4.56	4.21	2.32	1.27	43.02	76.39	192.93	792.64	4166.04	9.32	8.31	9.13	9.33	9.28	27.77	26.96	20.03	17.73	40.96
8.1	6.59	4.65	4.52	2.31	0.78	40.27	70.38	175.63	804.62	4223.31	9.58	8.21	9.26	9.64	9.68	30.83	29.66	22.66	20.30	44.59
9.0	6.91	4.78	4.72	2.29	0.76	37.76	64.88	159.79	802.29	4246.30	9.71	8.03	9.24	9.87	10.14	33.76	32.25	25.20	22.81	48.10
11.7	7.37	5.03	5.25	2.38	0.72	32.80	53.63	127.02	728.82	4308.72	8.65	6.57	7.99	9.80	11.15	42.84	40.42	32.96	30.54	58.92
14.4	7.88	5.20	5.65	2.41	0.68	29.90	46.76	106.67	624.56	4363.10	6.45	4.92	6.49	8.97	11.58	52.07	48.87	40.81	38.32	69.83
15.3	7.95	5.24	5.73	2.40	0.67	29.21	45.05	101.50	593.56	4379.71	5.81	4.54	6.11	8.64	11.63	55.01	51.57	43.31	40.78	73.33
16.2	7.99	5.26	5.90	2.41	0.66	28.63	43.54	96.90	564.29	4395.66	5.30	4.24	5.80	8.34	11.69	57.85	54.19	45.72	43.16	76.74

3 讨论

本文结果表明,在血栓生成前,无论是未裁剪桥血管远端模型还是裁剪远端模型,在桥血管远端区域均有涡流,且血流速度低,意味血液中物质在这些区域内停留的时间长,可能发生各种生化反应,进而生成血栓。DESSA 模型桥血管远端区域以及冠脉血管近端区域(吻合口足跟左侧区域)血液流动速度低,进而这些区域壁面附近的流体 RT 明显大于其他区域,而 RT 大则表明凝血酶浓度大^[7]。同时,这些紧邻桥血管远端端面区域 γ 小于给定阈值($100 s^{-1}$)^[7]。如表 1 数据所示,这些区域的 RT 大而 $\gamma < 100 s^{-1}$,进而 C 浓度大,导致血栓主要在这两个区域生成。和桥血管远端未裁剪模型相比,裁剪模型中桥血管远端剩余区域内流动特性发生变化,但生成血栓的流动条件依然存在。

对于桥血管远端未裁剪模型,桥血管区域血栓体积为 $15.05 mm^3$;对于桥血管远端裁剪模型,桥血管区域血栓体积为 $7.35 mm^3$ 。两者相比较,桥血管

远端裁剪后生成的血栓体积减小了约 51.2%,血栓减小量明显。51.2%的血栓体积减小量,由两部分组成:一部分是桥血管远端裁剪掉的体积(血栓减少);另一部分是吻合口上方生成的壁厚很薄的血栓(血栓增加)。如图 6 中 t_0 所示,在吻合口上方桥血管区域,紧贴血管壁有血栓生成。此部分血栓面积较大,最厚处壁厚约为 0.16 mm,为桥血管半径(1.50 mm)的 10.65%。而在桥血管远端无裁剪模型中,吻合口上方及左侧区域无血栓生成。Kato 等^[11]的临床研究指出,使用大隐静脉(远端没有进行裁剪处理)DESSA 冠脉搭桥术后 1 年的血管造影结果表明,桥血管远端血栓并没有引发副作用。临床上对桥血管远端的裁剪处理,其术后长期效果如何值得关注。目前还鲜有关于临床上桥血管远端不裁剪和裁剪的术后对比研究。

从表 2 数据可以看出,对于桥血管远端裁剪模型,所选取的 5 个点 $\gamma < 100 s^{-1}$,故在这些位置均有 C 生成;而对于桥血管远端未裁剪模型, P_4 和 P_5 点的 $\gamma > 100 s^{-1}$, P_3 点除了 16.2 s 时刻外, $\gamma > 100 s^{-1}$,

在这些位置就没有 C 生成。并且这 3 点的 RT 要比桥血管远端裁剪模型相应位置小(仅 P_3 点在 16.2 s 例外),综合作用的结果是 BP 浓度小于 200 nmol/L,即没有血栓生成。而对于 P_1 和 P_2 点,两个模型 $\gamma < 100 \text{ s}^{-1}$,但在桥血管远端未裁剪模型在此位置没有血栓生成。究其原因,主要是由于两个模型桥血管远端结构不同,进而流动特性不同,导致裁剪模型在 P_1 、 P_2 点 AP 及 C 的浓度大于未裁剪模型,在计算过程中未裁剪模型 P_1 、 P_2 点的 BP 浓度始终小于 200 nmol/L,而裁剪模型在计算开始不久, P_1 、 P_2 点的 BP 浓度就大于 200 nmol/L,即生成了血栓。

本文的主要局限性在于没有直接试验验证,但通过和文献[5]试验结果的定量比较,以及文献[12]报道的冠脉搭桥术(桥血管远端没有进行裁剪处理)后短时间在桥血管远端(越过吻合口足尖点)形成了一个人为的血管无血液流动空间(即血栓区域),可以确保本文计算结果的可靠性。

4 结论

本文使用血流动力学结合考虑生化反应的血液物质传输扩散模型的方法,初步研究 DESSA 桥血管远端血栓形成及分布情况。计算结果表明,临床中进行 DESSA 冠脉搭桥术,对桥血管远端进行裁剪处理,虽然可以有效减小桥血管生成的血栓体积,但吻合口上方桥血管壁面生成血栓对冠脉搭桥术后的影响还需进一步研究。

参考文献:

[1] LIU Z, YANG G, NAN S, *et al.* The effect of anastomotic angle and diameter ratio on flow field in the distal end-to-side anastomosis [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2020, 234(4): 377-386.

[2] HOBALLAH JJ, BECHARA CF. *Vascular reconstructions* [M]. New York: Springer, 2021: 257-266.

[3] NIINAMI H, TAKEUCHI Y. Coronary artery bypass grafting

using side-to-side anastomosis with distal end clipping of the saphenous vein graft [J]. *J Vasc Med Surg*, 2014, 2(3): 1-2.

- [4] LI H, XIE B, GU C, *et al.* Distal end side-to-side anastomoses of sequential vein graft to small target coronary arteries improve intraoperative graft flow [J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2014, 14: 65.
- [5] TAYLOR JO, WITMER KP, NEUBERGER T, *et al.* *In vitro* quantification of time dependent thrombus size using magnetic resonance imaging and computational simulations of thrombus surface shear stresses [J]. *J Biomech*, 2014, 136(7): 071012.
- [6] GHISTA DN, KABINEJADIAN F. Coronary artery bypass grafting hemodynamics and anastomosis design: A biomedical engineering review [J]. *Biomed Eng Online*, 2013, 12: 129.
- [7] MENICHINI C, XU XY. Mathematical modeling of thrombus formation in idealized models of aortic dissection: Initial findings and potential applications [J]. *J Math Biol*, 2016, 73(5): 1205-1226.
- [8] MARCINKOWSKA GA, GAPINSKI J, ELIKOWSKI W, *et al.* Comparison of three rheological models of shear flow behavior studied on blood samples from post-infarction patients [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2007, 45(9): 837-844.
- [9] GALJEE MA, VAN ROSSUM AC, DOESBURG T, *et al.* Quantification of coronary artery bypass graft flow by magnetic resonance phase velocity mapping [J]. *Magn Reson Imaging*, 1996, 14(5): 485-493.
- [10] SHINTANI Y, IINO K, YAMAMOTO Y, *et al.* Analysis of computational fluid dynamics and particle image velocimetry models of distal-end side-to-side and end-to-side anastomoses for coronary artery bypass grafting in a pulsatile flow [J]. *Circ J*, 2017, 82(1): 110-117.
- [11] KATO T, TSUNEKAWA T, MOTOJI Y, *et al.* The Side-to-side fashion for individual distal coronary anastomosis using venous conduit [J]. *Heart Vessels*, 2017, 32(4): 385-389.
- [12] AKIHIRO N, ATSUSHI K, KAZUHIKO T, *et al.* Side-to-side anastomosis in off-pump coronary artery bypass grafting [J]. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*, 2000, 8(4): 394-395.