

文章编号:1004-7220(2019)05-0481-05

微创血管夹齿型参数对血管力学性能的影响

张伟东¹, 崔海坡¹, 宋成利¹, 王成勇², 张涛^{2,3}, 张春晓¹, 程千莉¹

(1. 上海理工大学 现代微创医疗器械及技术教育部工程研究中心, 上海 200093; 2. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510000; 3. 东莞宜安新材料研究院有限公司, 广东 东莞 523662)

摘要:目的 分析微创血管夹齿型不同尺寸参数对小动脉血管力学性能的影响。方法 对微创血管夹夹持小动脉血管过程进行有限元仿真分析,研究5种不同齿型间距、齿型高度及齿型长度等尺寸参数对夹持小动脉血管过程中力学性能的影响规律。结果 血管夹的齿型间距越大,所夹持的小动脉血管段最大等效应力越小;小动脉血管的最大等效应力与血管夹的齿型高度并不呈线性关系。当齿型高度为75 μm ,小动脉血管的最大等效应力最低,对血管损伤最小;血管夹的齿型长度对夹持的小动脉血管力学性能影响较大,血管的最大等效应力与血管夹的齿型长度成正比。结论 微创血管夹齿型的尺寸参数对夹持小动脉血管过程中的力学性能有重要影响,研究结果可为微创血管夹的设计开发提供指导。

关键词:微创外科手术;血管夹;等效应力;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.05.005

Effects from Size Parameters of Minimally Invasive Vascular Clamp on Vascular Mechanical Properties

ZHANG Weidong¹, CUI Haipo¹, SONG Chengli¹, WANG Chengyong², ZHANG Tao^{2,3}, ZHANG Chunxiao¹, CHENG Qianli¹

(1. Shanghai Institute for Minimally Invasive Therapy, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510000, China; 3. Institute of Eontech New Materials Co., Ltd., Dongguan 523662, Guangdong, China)

Abstract: Objective To analyze the influence from size parameters of minimally invasive vascular clamp on mechanical properties of small arteries. **Methods** The finite element simulation analysis on the process of minimally invasive vascular clamp clamping small arteries was performed. The influence patterns of 5 different sawtooth spacing, sawtooth heights and sawtooth lengths on mechanical properties of small arteries were studied. **Results** Larger sawtooth spacing led to smaller maximum equivalent stress of the clamped artery. The maximum equivalent stress of the small artery was not linear with the sawtooth height of the vascular clamp. The maximum equivalent stress of the small artery was the smallest and the vascular injury was the minimal when the sawtooth height was 75 μm . The sawtooth length of the vascular clamp had an important influence on mechanical properties of clamped small arteries. The maximum equivalent stress of the artery was proportional to the sawtooth length of the vascular clamp. **Conclusions** The size parameters of minimally invasive vascular clamp had an important influence on mechanical properties in the process of clamping small arteries. The research findings can provide guidance for the design of the minimally invasive vascular clamp.

Key words: minimally invasive surgery; vascular clamp; equivalent stress; finite element analysis

收稿日期:2018-09-04; 修回日期:2018-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51735003)

通信作者:崔海坡,副教授, Email: h_b_cui@163.com

随着医疗行业的发展,微创手术器械在临床的应用越来越广泛。在微创手术中,血管夹可以起到止血或者控制血管血流方向的作用,从而保证手术的顺利完成。但血管夹在使用时会对血管造成一定损伤,如血管夹总体结构设计不合理,则在夹持血管过程中易导致夹持力过大,从而造成血管外膜损伤、交叉感染等问题^[1-2]。因此,对血管夹导致的血管创伤研究也在不断深入,国内外学者开展了众多基于生物材料、生物力学和组织学等方面的研究,利用不同接触和损伤模型评价器械的安全性和有效性^[3-4]。Gasser等^[5]在考虑残余应力的条件下建立大动脉血管夹三维有限元模型,结果表明在血管夹夹持区域内存在一个拉伸应力峰值区,在一定程度上会导致血管内膜的损伤。Famaey等^[6]建立血管夹夹持大鼠腹主动脉三维有限元模型,并进行活体验证实验。Hajizadeh等^[7]建立大动脉有限元模型,研究市面上不同血管夹的夹持机理,并提出一种新型的血管夹模型。朱巍等^[8]研究发现,微创缝合抓钳及血管夹的材料力学性能及其齿型设计与组织接触应力有密切关联,过大的接触压力会导致组织坏死。Rylski等^[9]研究认为,血管夹对夹持血管的压力分布不均匀,这种不均匀的应力分布会导致主动脉损伤。血管夹对血管的损伤程度与血管夹夹持血管的压力、血管夹齿口几何形状、血管管径、夹闭时间、血管健康状况等因素有密切联系^[10-11]。新型血管夹设计应尽量减小夹持血管的应力集中,从而降低夹紧过程中对血管的损伤。血管夹的齿型参数对夹持血管过程中的应力集中现象影响较大,而目前针对微创血管夹齿型在夹持血管过程的力学性能影响鲜有报道。

本文应用有限元分析软件 ANSYS,模拟分析微创血管夹夹持小动脉血管的过程,并分别研究5种不同齿型间距、齿型高度及齿型长度对小动脉血管的力学性能影响,以期对微创血管夹的设计开发提供指导。

1 材料与方法

1.1 几何模型

微创血管夹的上下两部分为对称结构设计,通过中间转动轴连接。血管夹全长为35 mm,夹持口长度为13.5 mm,夹持口宽度为1 mm。根据已有参

数利用3D建模软件 SolidWorks 建立该模型。其中,所选取的血管段模型直径为4 mm,厚度为0.25 mm,长度为27 mm。

为比较微创血管夹齿型参数对小动脉力学性能的影响规律,选择3项齿型参数,即齿型间距(d)、齿型高度(h)、齿型长度(上齿长 l_1 与下齿长 l_2),每项参数均分析5组尺寸,如表1所示。

表1 齿型参数尺寸

Tab.1 Size parameters of sawtooth

序号	d/mm	h/mm	l_1/mm	l_2/mm
1	0.20	0.100	0.20	0.40
	0.25			
	0.30			
	0.35			
	0.40			
2	0.20	0.050	0.20	0.40
		0.075		
		0.125		
		0.150		
3	0.40	0.100	0.15	0.25
			0.20	
			0.30	
			0.35	

1.2 材料参数

血管的力学性质主要取决于血管壁中层弹性纤维、胶原纤维和平滑肌这3种组分的含量百分比、空间构型和各自的力学性质^[12-14]。根据已有文献^[15],所选小动脉血管段的材料采用三参数(C_{10} 、 C_{01} 和 C_{20})的 Mooney-Rivlin 超弹性材料。其中 $C_{10}=18.90$ kPa, $C_{01}=2.75$ kPa, $C_{20}=85.72$ kPa, 不可压缩参数 $d=5\times 10^{-5}$ 。由于主要研究微创血管夹齿型的尺寸参数对小动脉血管力学性能的影响规律,而对血管夹材料无特殊要求,故血管夹材料选择常用的医用不锈钢材料,密度 $\rho=7850$ kg/m³,弹性模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$,抗拉强度和抗压强度均为0.25 GPa。

1.3 载荷与边界条件

1.3.1 载荷条件 在弹簧连接部份对弹簧进行预紧力设置,对处于预压缩状态弹簧的预紧力设定为1.2 N。另外,在动脉模型的建立过程中应充分考虑到血管的力学特性。根据已有文献^[5,16],在微创血管夹夹持小动脉血管过程中需要考虑动脉血管

径向力, 设定为 1.5 kPa。

1.3.2 边界条件

边界条件主要分 3 步进行设置: ① 完成血管夹中间转轴的转动副连接设置后, 进行血管夹夹面与小动脉血管段的接触设置, 接触类型设定为摩擦接触, 摩擦系数为 0.73; ② 进行弹簧连接设置, 其中弹簧的劲度系数为 0.3 N/mm; ③ 对中间转轴及小动脉血管段端面进行全固定约束。

2 有限元分析结果

2.1 不同齿型间距对血管力学性能的影响规律

完成边界条件及载荷设置后, 对模型划分网格并进行静应力分析。对于表 1 中 5 组不同齿型间距, 血管夹均能理想地闭合小动脉血管段。图 1 所示为第 1 组参数中 $d=0.30\text{ mm}$ 时, 血管夹夹持小动脉血管的位移云图。血管夹尖端位移量约为 3 mm, 而小动脉血管段位于夹持口中间部位, 闭塞情况良好, 满足手术要求。

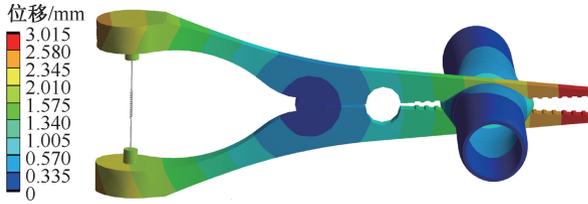


图 1 血管夹夹持小动脉血管位移分布
 Fig.1 Displacement distributions of vascular clamp clamping artery

图 2 所示为 $d=0.30\text{ mm}$ 时小动脉血管段的应变分布。所夹持小动脉血管的最大应变为 0.208, 位于近夹口端。

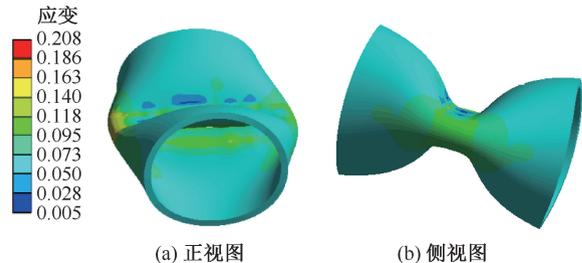


图 2 $d=0.30\text{ mm}$ 时血管应变分布
 Fig.2 Strain distributions of artery at $d=0.30\text{ mm}$
 (a) Front view, (b) Lateral view

图 3 所示为 $d=0.30\text{ mm}$ 时小动脉血管段的应力分布。血管夹所夹持的小动脉血管最大应力区

域位于夹持部位的近夹口端, 最大应力为 0.43 MPa。

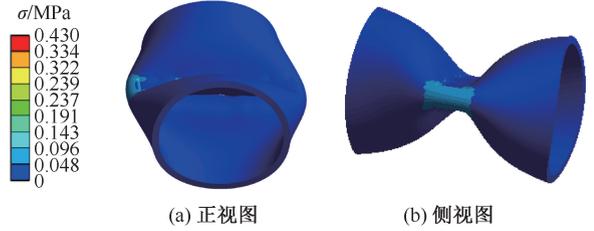


图 3 $d=0.30\text{ mm}$ 时血管等效应力分布
 Fig.3 Equivalent stress distributions of artery at $d=0.30\text{ mm}$
 (a) Front view, (b) Lateral view

由所夹持小动脉血管段最大等效应力随齿型间距的变化曲线可见, 小动脉血管的等效应力与齿型间距成反比(见图 4)。当 $d=0.40\text{ mm}$ 时, 血管的最大等效应力为 0.40 MPa, 在 5 种不同齿型间距中数值最小; 推测原因是微创血管夹与小动脉血管接触的夹持面积随着齿型间距的增大而增大, 故在夹持力一定时, 最大应力会逐渐减小。

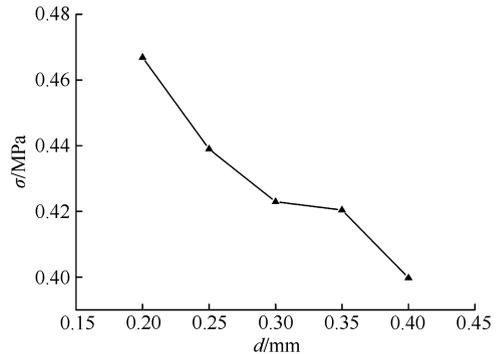


图 4 血管等效应力随齿型间距变化曲线
 Fig.4 Variation of equivalent stress of artery with sawtooth spacing

为了比较不同血管尺寸下血管等效应力随齿型间距的变化关系, 综合分析动脉血管管径 $r=3.0$ 、 4.0 、 5.0 mm 时, 被夹持小动脉血管段最大等效应力随齿型间距的变化关系(见表 2)。小动脉血管段最大等效应力与齿型间距均成反比。微创血管夹在结构设计时, 应尽量避免在夹持血管过程中产生应力集中, 并降低夹持血管所受的最大应力, 从而减小对血管造成的外膜损伤、交叉感染等问题。基于这一设计原则, 对于本文所设计的血管夹而言, $d=0.40\text{ mm}$ 时最优。

表2 不同管径下血管最大应力

Tab.2 Maximum stress of artery with different artery diameters

r/mm	d/mm					MPa
	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	
3.0	0.527	0.514	0.508	0.497	0.486	
4.0	0.467	0.439	0.423	0.420	0.400	
5.0	0.443	0.420	0.412	0.406	0.385	

2.2 不同齿型高度对血管力学性能的影响规律

有限元分析表明,对于表1中的5组不同齿型高度,微创血管夹均能理想闭塞小动脉血管。为直观地分析不同齿型高度对血管力学性能的影响规律,绘制5组不同齿型高度参数下小动脉血管最大等效应力随齿型高度的变化曲线(见图5)。小动脉血管的最大等效应力与齿型高度并不成线性关系,在 $h=75\ \mu\text{m}$ 时,小动脉血管段的最大等效应力为0.427 MPa,低于 $h=50\ \mu\text{m}$ 时的应力。本文推测血管具有一定的厚度,呈现超弹性,且在一定的应力范围内会出现应力松弛效应。当 $h>75\ \mu\text{m}$ 后,随着齿型高度的增加,所夹持小动脉血管与微创血管夹齿型的接触面积减小,血管段的最大等效应力增大。由此可见,对于本文所选择的5种齿型高度而言,当 $h=75\ \mu\text{m}$ 时,小动脉血管段的最大等效应力最低,为最优设计。

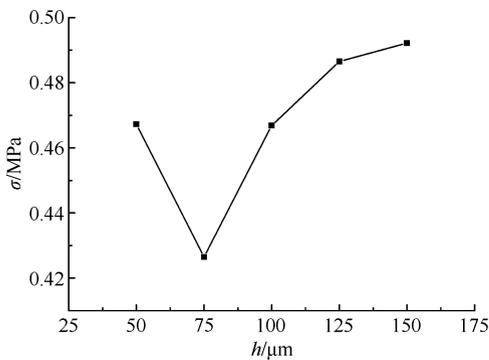


图5 血管等效应力随齿型高度变化曲线

Fig.5 Variation of equivalent stress of artery with sawtooth height

2.3 不同齿型长度对血管力学性能的影响规律

仿真分析表明,对于表1中的5组不同齿型长度,微创血管夹均能理想地夹持闭合小动脉血管。为进一步研究不同上、下齿长 l_1 、 l_2 对血管段力学性能的影响规律,且考虑到所选齿型为 $l_2=2l_1$ 的等腰

梯形齿,绘制小动脉血管段最大等效应力随 l_2 的变化曲线(见图6)。小动脉血管段最大等效应力随下齿长 l_2 增加而增大。推测齿型长度越大,小动脉血管与齿型下表面的接触面积就越小,从而在载荷水平相同的情况下,等效应力就越大。此外,当 $l_2=0.3\ \text{mm}$ 时,血管最大等效应力为0.365 MPa;而当 $l_2=0.7\ \text{mm}$ 时,血管最大等效应力为0.509 MPa,提高了39.5%,可见血管夹的齿型长度对预夹紧的小动脉血管力学性能有重要影响。

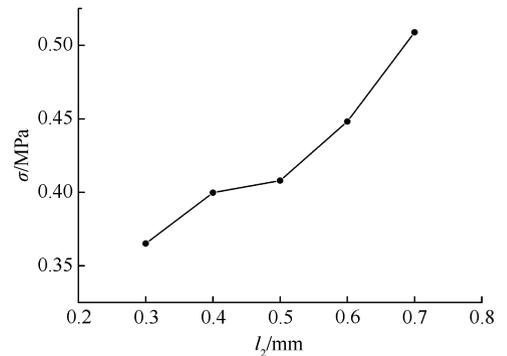


图6 血管等效应力随下齿长变化曲线

Fig.6 Variation of equivalent stress of artery with sawtooth length

考虑到人体动脉血管应力会随血管脉动而变化,计算动脉血管径向力为3.0、4.5 kPa时被夹持小动脉血管段最大等效应力随下齿长 l_2 的变化关系(见表3)。小动脉血管段最大等效应力与 l_2 成正比,与血管径向力为1.5 kPa时有相同的变化规律。

表3 不同径向力下血管最大等效应力

Tab.3 Maximum equivalent stress of artery under different

血管径向力/kPa	l_2/mm					MPa
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
3.0	0.867	0.878	0.887	0.969	1.121	
4.5	1.040	1.074	1.099	1.127	1.397	

3 讨论与结论

随着现代医疗技术水平不断进步及微创手术的推广,微创手术器械的设计与制造成为医疗器械领域的重要发展方向之一。目前国内外所开展的研究多数基于生物材料、生物力学和组织学等方面,研究者认为股动脉旁路手术后股动脉狭窄的发生率与血管夹的夹持时间有关,而与先前存在的动

脉粥样硬化无关^[17],血管夹夹持血管过程中血管不均匀的应力分布更易导致动脉损伤。此外,血管夹的齿型参数对夹持血管过程中的应力集中现象影响较大。本文针对微创血管夹夹持面上的齿型开展研究,分析不同齿型间距、齿型高度及齿型长度这三方面因素对血管力学性能影响的规律。由本文分析结果可知:①血管夹的齿型间距越大,所夹持小动脉血管段的最大等效应力越小,即夹持过程中血管的最大等效应力与齿型间距成反比。②小动脉血管的最大等效应力与血管夹的齿型高度并不呈线性关系。对于5组齿型高度($h=50、75、100、125、150\ \mu\text{m}$), $h=75\ \mu\text{m}$ 时小动脉血管的最大等效应力最低,对血管损伤最小。③血管夹的齿型长度对于夹紧的小动脉血管力学性能有重要影响,血管的最大等效应力与血管夹的齿型长度成正比。上述规律性分析结果可以为微创血管夹的结构设计提供指导。

考虑到实际手术过程中患者血压处于脉动状态,且不同患者血压不同,故为探讨上述结论的普适性,本文对血管径向力为1.5、3.0、4.5 kPa条件下,被夹持小动脉血管最大等效应力随血管夹齿型长度的变化关系展开研究。由分析结果可知,在不同血管径向力条件下,血管最大等效应力与血管夹齿型长度均成正比。除了齿型的尺寸参数外,微创血管夹的设计也应在其他方面进行改进。例如,考虑到微创血管夹在使用过程中会出现交叉感染及金属镍残留引起组织过敏等问题,应采用一些优于不锈钢、钛合金等当前主流医用金属材料性能的新型材料。此外,最大应力主要集中于血管段的近夹口端。因此,如何改进微创血管夹的剪状结构设计也是后续研究的方向之一。

参考文献:

- [1] AARON G, ROSENBERG. Surgical evolution: Development of minimally invasive surgery [J]. *Op Tech Ortho*, 2006, 16(2): 84-86.
- [2] 余宽宽,梁向党,孙赓,等. 血管夹对大鼠颈总动脉挤压损伤的研究[J]. *解放军医药杂志*, 2015, 27(3): 28-31.
- [3] ZHANG Y, KANETAKA H, SANO Y, et al. Pressure controlled clamp using shape memory alloy for minimal vessel

invasion in blood flow occlusion [J]. *Ann Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 19(1): 35-42.

- [4] 蒋大为. 微创医疗器械与精密数控加工[J]. *金属加工(冷加工)*, 2016(20): 14-15.
- [5] GASSER TC, CHRISTIAN AJ, SCHULZE-BAUER, et al. A three-dimensional finite element model for arterial clamping [J]. *J Biomech Eng*, 2002, 124(4): 355-356.
- [6] FAMAEEY N, SOMMER G, VANDER SJ, et al. Arterial clamping: Finite element simulation and *in vivo* validation [J]. *J Mech Biomed Mater*, 2012, 12(8): 107-118.
- [7] HAJIZADEH FS, ABOLFATHI N, MEHMANESH H, et al. Design and finite element analysis of a novel smart clasper for aortic cross-clamping in minimally invasive surgery [J]. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2015, 25(1): 15-21.
- [8] 朱巍,宋成利,赵灵犀,等. 腹腔镜器械与生物组织的接触力学分析[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(3): 234-240.
- [9] ZHU W, SONG CL, ZHAO LX, et al. Mechanical analysis of laparoscopic instruments when contacting with biological tissues [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(3): 234-240.
- [10] RYLSKI B, SCHMID C, BEYERSDORF F, et al. Unequal pressure distribution along the jaws of currently available vascular clamps; Do we need a new aortic clamp? [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2016, 49(6): 1671-1675.
- [11] CHEN HY, NAVIA JA, SHAFIQUE S, et al. Fluid-structure interaction in aortic cross-clamping: Implications for vessel injury [J]. *J Biomech*, 2010, 43(2): 221-227.
- [12] ROTELLAR F, PARDO F, MARTÍ-CRUCHAGA P, et al. Bleeding control during laparoscopic hepatic surgery: Usefulness of vascular clamps and barbed sutures [J]. *HPB*, 2016, 18(S1): 590-591.
- [13] 齐颖新. 血管力学生物学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(S1): 80-84.
- [14] QI YX. Advances in vascular biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(S1): 80-84.
- [15] 岳树坤. 冠脉血管三维建模与血液动力学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [16] 马志坚,白丽萍,毕春,等. 有限元分析在血管损伤中的应用[J]. *河北医科大学学报*, 2017, 38(8): 983-988.
- [17] JOHN K. Arterial wall properties in men and women: Hemodynamic analysis and clinical implications [M]. USA: Springer International Publishing, 2018: 291-306.
- [18] 王婉洁. 动脉血管和粥样硬化斑块的力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [19] BIANCA H, VRIENS, ROBERT A, et al. Arterial clamping leads to stenosis at clamp sites after femoropopliteal bypass surgery [J]. *Am J Surg*, 2015, 210(3): 536-544.