

钳齿形貌对腹腔镜夹钳安全性的影响

田云鹏¹, 闫士举¹, 宋成利¹, 王成勇², 张涛^{2,3}

1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510000; 3. 宜安新材料研究院, 广东 东莞 523662

【摘要】目的:对比不同齿形腹腔镜夹钳的夹持效果,以确定其各自安全夹持组织的能力,为夹钳优化设计提供参考。**方法:**通过ANSYS有限元分析,对比梯形齿、钉形齿、直角楔形齿、等腰楔形齿4种齿形钳头压缩量和牵拉效果关系,并通过应变云图分析夹持能力不同的原因。以钳头夹持组织不损伤、不滑脱为判断标准,评价各齿形夹持能力。**结果:**直角楔形齿具有最优越的安全夹持能力,钉形齿最容易损伤组织,且其安全牵拉能力最差;梯形齿安全牵拉能力与等腰楔形齿相近,但等腰楔形齿安全压缩量更优。齿数对牵拉效果影响明显。**结论:**腹腔镜夹钳夹持能力取决于钳齿形貌和齿数,安全夹持性由最大应力和钳制能力共同决定。峰值应力大的齿形并不表示夹持能力强,牵拉能力应考虑钳制变形能力。

【关键词】腹腔镜夹钳;齿形;等效应力;有限元分析

【中图分类号】R318.01

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)06-0774-06

Effects of teeth profile on the safety of laparoscopic grasper

TIAN Yunpeng¹, YAN Shiju¹, SONG Chengli¹, WANG Chengyong², ZHANG Tao^{2,3}

1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Institute of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510000, China; 3. Institute of Eontech

New materials Co., Ltd, Dongguan 523662, China

Abstract: Objective To analyze the clamping capabilities of laparoscopic graspers with different teeth profiles during tissue clamping operation, thereby providing valuable reference for the design of grasper. **Methods** ANSYS was used for finite element analysis. The relationships between the compression and the traction effect of 4 kinds of teeth profiles (trapezoidal, nail-shaped, right-angled wedge-shaped and isosceles wedge-shaped) were compared, and the reasons for different clamping capabilities were analyzed by strain nephogram. Taking the tissue clamping without damages or slippage as the standard, the clamping capabilities of different teeth profiles were evaluated. **Results** The right-angled wedge-shaped teeth had the best ability to clamp tissues, while the nail-shaped teeth caused damages to tissues easily and had the worst traction performance. The trapezoidal teeth and isosceles wedge-shaped teeth had similar traction performances, but the compression of isosceles wedge-shaped teeth was better. Moreover, the teeth number had obvious effects on traction performance. **Conclusion** The clamping capability of laparoscopic grasper depends on the profile and number of teeth; and the safety of clamping tissues by laparoscopic grasper is determined by peak stress and clamping capability. The teeth profile with a high peak stress does not mean that the grasper has a strong capability of tissue clamping, and the capability of clamp deformation should be considered in the evaluation of traction capability.

Keywords: laparoscopic grasper; teeth profile; equivalent stress; finite element analysis

前言

腹腔镜手术中,医疗器械作为手术操作的必要工具,其安全性能对手术效果的影响至关重要。医源性

损伤往往是医疗器械作用于组织时造成损伤而引起的术后溃疡、坏死等并发症^[1-3]。腹腔镜夹钳作为移动、牵拉组织的手术工具,其安全性一般考虑夹持组织损伤和牵拉组织的滑脱^[4],而损伤和滑脱则取决于钳头形貌和作用尺寸所带来的物理变形和力。手术时,夹持力越大组织越不容易滑脱,但更容易造成损伤,组织不滑脱牵拉距离是评价夹钳性能的重要指标^[5]。不同形貌钳头的夹持效果不同,钳头齿型参数对力学性能影响明显^[6]。圆润边缘提供的压力峰值小,不同大小的齿夹持时造成的峰值应力不同,大的齿更易损伤组织^[1]。朱

【收稿日期】2019-12-18

【基金项目】国家自然科学基金重点项目(51735003)

【作者简介】田云鹏,在读研究生,研究方向:精密医疗器械, E-mail: 841928442@qq.com

【通信作者】闫士举,副教授,研究方向:微创医疗器械, E-mail: yanshij99@aliyun.com

巍等^[7]通过力学模型分析认为圆形齿与组织接触应力较楔形齿小,但圆形齿易滑脱。王进等^[8]证明增加钳头边缘倒角曲率半径和齿形弧度均可以减轻夹持时造成的组织表面和血管的损伤。Heijnsdijk等^[9]通过建立损伤滑移对比分析不同抓钳抓取组织时的性能,认为接触面积增大能减少滑移和损伤发生,且增大接触面积对损伤的影响显著于滑脱。腹腔镜夹钳夹持效果分为夹紧和牵拉,其中牵拉取决于夹钳对组织的粘附和变形作用,且变形起主要作用^[10]。粘附作用主要由摩擦力决定^[11],而变形作用受制于夹钳对组织的钳制。不同形貌的夹钳作用于组织时,造成的应力不同,这是影响夹持安全的主要因素。因为形变方式、作用于组织的应力集中区域差异,使得不同钳齿牵拉能力不同。

物理实验一般通过肉眼观察判断组织是否损伤和滑移,使得结果有一定误差。通过有限元分析能够准确判断组织滑移发生点和滑移距离,定义损伤,以判断不同夹钳的夹持是否安全。本文通过模拟压缩和牵拉组织这一手术动作,对比不同齿型夹持下所具有的牵拉效果,用牵拉距离衡量夹持时的组织滑脱难易程度,即组织形变所带来的夹持效果。

1 材料与方法

1.1 设计原理

腹腔镜夹钳作用于组织,夹持效果受垂直于组织的压缩和横向的牵拉两部分因素的影响,故模拟动作为钳头的压缩和横向的移动两个阶段(图1)。通过对比不同形貌钳头对组织的压缩和牵拉效果来反映其夹持性能,其中最大等效应力对应组织是否损伤,不滑移牵拉距离对应夹钳的牵拉能力。牵拉时,以组织横向位移第一个峰值为判断点,峰值位移即不滑移最大牵拉距离。

根据De^[12]的研究结果,我们将组织损伤夹持安全应力极限设为200 kPa。组织受压情况下应变率可达40%^[13-14],在4 mm厚的组织上测试压缩量为0~1.6 mm。接触状态为摩擦系数0.1的摩擦接触^[12]。

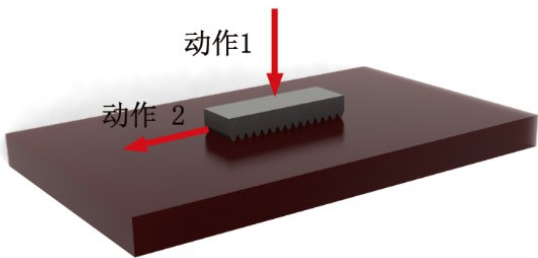


图1 夹持动作示意图
Fig.1 Diagram of clamping action

动作1表示压缩;动作2表示横向移动

对组织边界约束条件为:牵拉方向的组织端面不做约束,其对称面作固定约束,组织其余两个侧面限制除牵拉方向外的其他移动自由度。

1.2 分析模型

对比不同形貌夹钳夹持时的特点,夹持时上下两钳页具有对称性,简化采用1/2夹钳的单个钳页分析。选用如图2的4种不同形貌的钳头作为分析对象。钳体尺寸相同,4种钳齿高度相同,尺寸参数见表1。夹持过程中,夹钳对于组织只接触很小一部分,直接受力和变形发生在接触区域一定的范围内。为保证模拟结果的准确性,减少边界约束对组织受力变形等结果的影响,组织建模边界远离钳体作用位置,模拟初始位置为单个钳头置于组织表面中心处。肝脏组织模型为50×50×4的立方体。

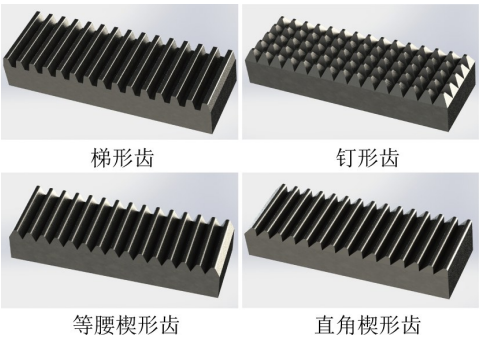


图2 不同齿形钳头模型
Fig.2 Models of grasper jaws with different teeth profiles

1.3 材料属性

肝脏组织作为一种含水量较高的实体器官,这里认为是各向同性,不可压缩的^[15-16]。选用1storder Ogden超弹性材料模型^[17-19],材料参数^[20]为 $\alpha=20.82$, $\mu=0.002\ 227\ \text{MPa}$ 。夹钳材料选用普通结构钢,密度 $\rho=7\ 850\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比 $\nu=0.3$,杨氏模量 $E=200\ \text{GPa}$ 。

2 结果

2.1 钳头牵拉效果

图3显示了采用4种钳头压缩时肝脏组织的最大等效应力与其被压缩距离的关系。可见应力增长速率随压缩距离增加呈上升趋势。不同形貌钳头夹持下组织的峰值应力不同,增长速率不同。图3表明4种形貌钳头作用下组织的最大等效应力均一定程度地超过了安全界限。直角楔形齿钳头采用不同齿数,组织最大等效应力在压缩量较小时区别并不明显,压缩量超过1 mm后较多齿数的钳头才使组织具有稍小的最大等效应力,而出现差别时应力都已超过了本文定义的安全应力界限。

表 1 各钳头齿型参数
Tab.1 Size parameters of grasper jaws with different teeth profiles

齿型	钳体尺寸			齿高/mm	齿根宽/mm	倒圆半径/mm	齿数/个
	长/mm	宽/mm	高/mm				
梯形齿	15	5	2	0.75	0.35(齿顶)1(齿根)	0.10	1*15
钉形齿	15	5	2	0.75	1	0.20	5*15
等腰楔形齿	15	5	2	0.75	1	0.20	1*15
直角楔形齿	15	5	2	0.75	1	0.20	1*15
直角楔形齿	15	5	2	0.75	1	0.20	1*10
直角楔形齿	15	5	2	0.75	1	0.20	1*5

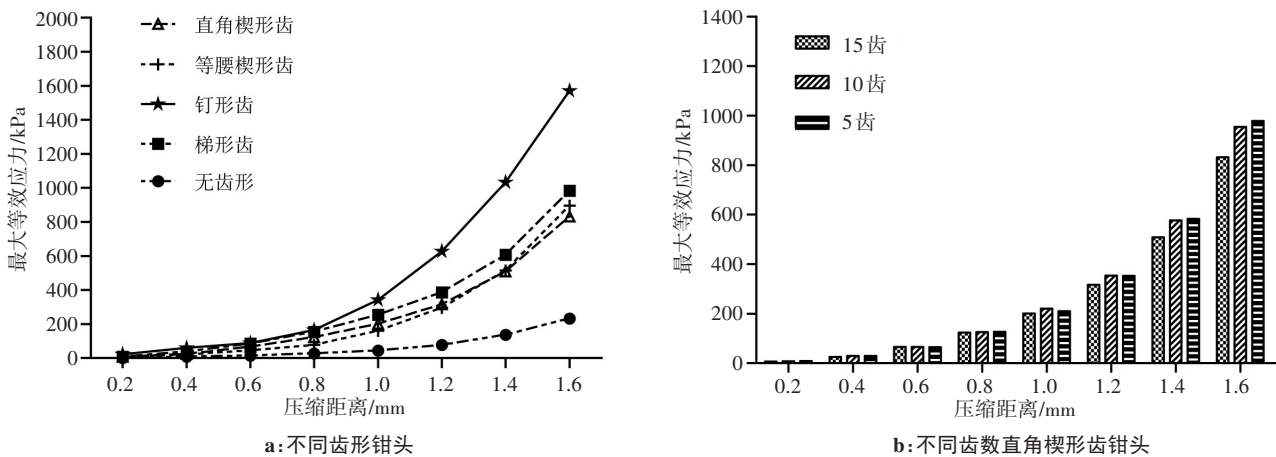


图 3 组织最大等效应力随压缩距离变化曲线
Fig.3 Relationship between peak equivalent stress and compression distance

图 4 所示为夹持过程中,钳头牵拉组织横向移动时,组织不滑脱条件下钳头横移距离。图 4a 中可以看到随着压缩距离的增加,牵拉距离增大,不同齿形所具有的牵拉能力区别明显。且随着压缩量的增加,钳头所具有的牵拉能力呈上升趋势,这在梯形齿钳头体现最为明显。梯形齿在 0.9 mm 之前的牵拉能力介于两楔形之间,在 0.9 mm 之后突增,这是钳齿对组织的钳制效果在不同压缩量下的体现。直角楔形齿和等腰楔形齿有相似的外形,其牵拉距离增长率近似,但直角楔形齿牵拉能力优于等腰楔形齿。图 4b 显示齿数差异带来的牵拉作用仍然区别明显,压缩距离和齿数的增加均使得牵拉距离上升。

因肝脏属于实体器官,钳头作用于组织时,组织变形并不完全包覆于钳齿,这可以从组织应变上得到一定的体现。各钳头在 0.8 mm 压缩下滑脱前作用组织的应变云图如图 5 所示,且采用统一颜色图例以更好地对比不同齿形作用下组织的应变大小;钳体运动方向为图中向右。可以看出最大应变发生在钳体边缘位置,各齿形钳齿作用组织所造成的组织应

变分布有明显差异。

2.2 安全牵拉

最大安全等效应力考虑夹持和牵拉共同作用。做出所有齿形安全牵拉距离范围(图 6),即等效应力峰值在 200 kPa 以下,并以压缩量 0.05 mm 为测量单位的钳头不滑脱横向移动距离。可以看出不同齿形安全夹持区域不同,牵拉能力差异明显,直角楔形齿钳头在安全范围和牵拉距离上有较优效果,钉形齿钳头安全范围最小。在各夹持数值安全区域内,所有操作均不会对组织造成损伤,这便使确定不同齿形安全夹持参数具有意义。根据最大安全牵拉距离,对比 4 种齿形钳头此时压缩和牵拉对等效应力的影响(表 2),等腰楔形齿牵拉影响最大,直角楔形齿影响最小。最大等效应力相近时,垂直压力受齿形和压缩量影响从而不同齿形施加于组织不同的力。最大的压力为梯形齿钳头受 1.39 N 压力,这小于王进等^[8]使用的 3 N 压力和 Li 等^[5]确定的 3.5 N 的安全力,这是钳齿参数不同以及安全应力取用较小值的缘故。

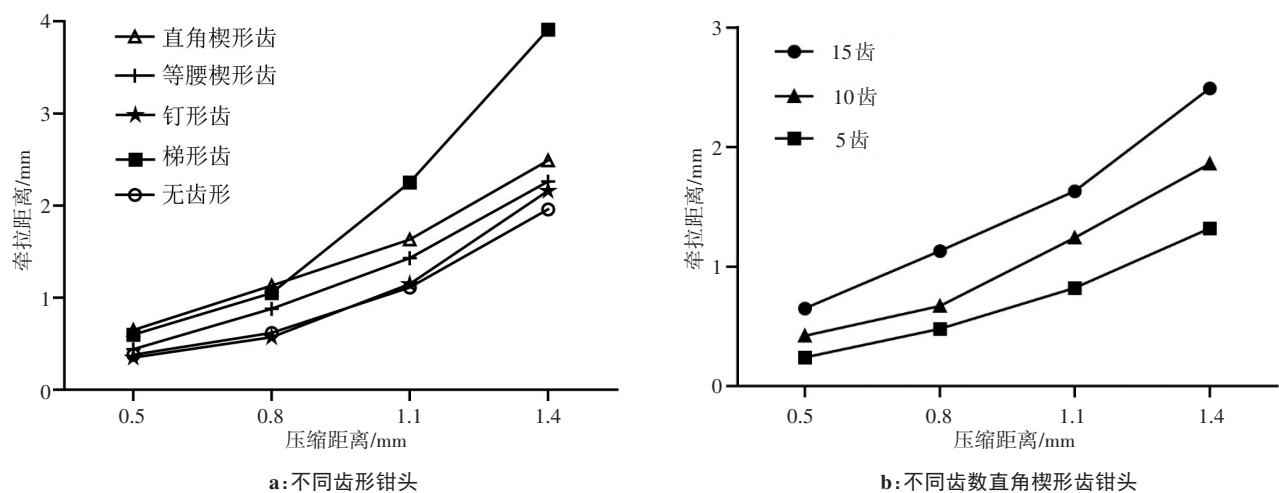


图4 不滑脱牵拉距离与压缩距离关系曲线
Fig.4 Relationship between non-slippage traction distance and compression distance

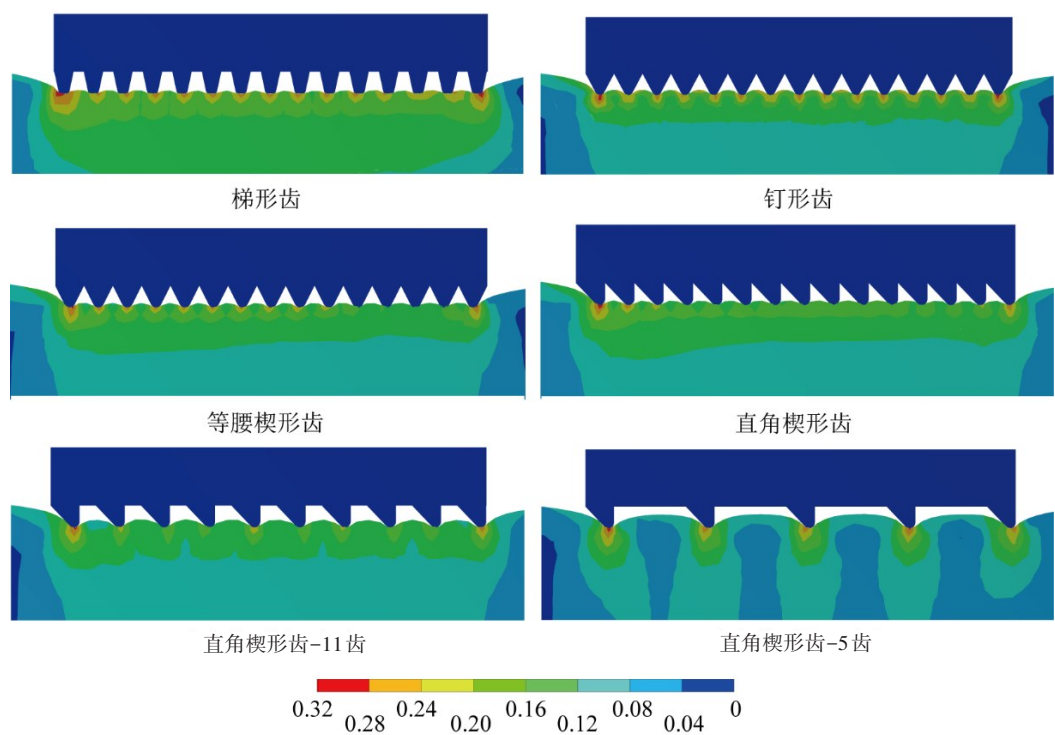


图5 各齿形钳头在0.8 mm压缩量时作用组织的应变云图
Fig.5 Strain nephograms of clamping tissues by different grasper jaws at 0.8 mm compression

3 讨论

组织材料破损前的应力应变呈正相关,应变区域和数值可以反映应力分布,图5的应变显示钉形齿齿尖和梯形齿棱边造成了更突出的应力集中现象。不同齿形作用于组织的应力大小、分布均有差异,所带来的夹持效果也区别明显。图3a中的4种齿形钳头作用于组织的等效力均高于无齿形钳头。但最大等效力与牵拉能力并不直接对应,钉形齿钳头牵拉能力仅与无齿形钳头相近(图4),另外3种钳头在不同压缩量下均表现出更优越的牵拉能力,这是

变形力和摩擦力的共同作用。钳齿作用效果中,变形力起主导作用,这体现在接触面积少于无齿形钳头(图5),但牵拉能力更优。各钳头作用于组织时,钳齿与组织接触只占很小一部分面积,所以其牵拉能力主要来源于组织的变形作用,无齿形钳头底面与组织完全贴合,依靠压力所带来的摩擦力实现牵拉,所以在摩擦系数固定的模拟条件下,无齿形钳头表现出一定的牵拉能力。但摩擦系数更小或表面接触湿润时,无齿形钳头的牵拉能力便会快速下降,这时夹持就需要钳齿对组织的变形钳制作用实现。

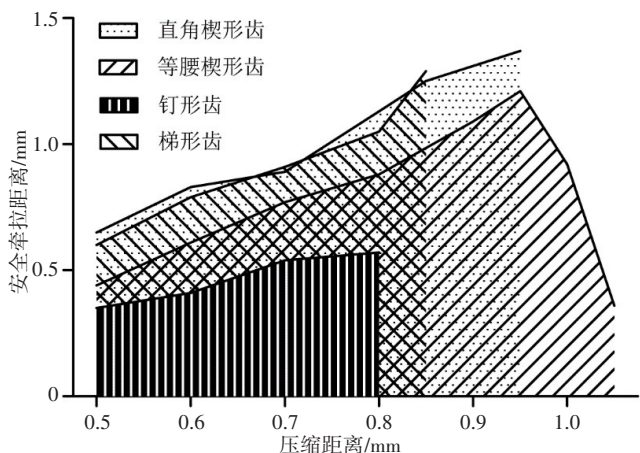


图6 不同齿形钳头安全夹持范围

Fig.6 Safety clamping ranges of grasper jaws with different teeth profiles

表2 各钳头最大安全牵拉距离时的参数

Tab.2 Parameters of grasper jaws at the maximum safe traction distance

齿型	压缩距离/mm	牵拉距离/mm	压缩终点应力/kPa	牵拉滑脱点应力/kPa	牵拉应力增量/压缩应力增量	垂直压力/N
梯形齿	0.85	1.29	178	200	0.12	1.39
钉形齿	0.80	0.57	166	194	0.17	0.70
等腰楔形齿	0.95	1.21	129	177	0.37	1.32
直角楔形齿	0.95	1.37	167	180	0.08	1.29

将钳齿右侧组织区域称为钳制支柱区,较大的应变使得这一区域组织具有更多的应变能,钳齿挤压时,其抵抗继续变形的能力就更强。图5显示直角楔形齿和梯形齿作用下的支柱区应变在0.16~0.20范围内,这使得其具备更强的牵拉能力。而钉形齿钳头因其多齿的分布和0.12~0.16的支柱区应变,钳制能力表现为最弱。甚至将支柱区应变同为0.12~0.16的钉形齿钳头和十齿等腰楔形齿钳头横向对比,钉形齿钳头牵拉能力依然劣势。梯形齿支柱区应变有转变至0.20~0.24的趋势,压缩量的继续增大即使得梯形齿具有了更突出的钳制能力(图4a)。不同齿数的直角楔形齿钳头作用下的组织支柱区应变区别明显,所以其钳制组织能力与齿数呈现出正相关关系。

比较不同齿形的性能,在安全应力200 kPa条件下,各钳头对组织最大等效应力和钳制效果不同使得其安全作用范围有较明显差别。图6中的结果显示,钉形齿的夹持效果最差,这缘于钉形齿尖作用于组织的应力集中现象,齿形与组织间的钳制效果差,使得安全压缩距离和不滑移牵拉距离均最小。梯形齿钳头作用最大等效应力稍大于两种楔形齿,所以其安全压缩量小于楔形齿,但其钳制组织的能力优越,在较小压缩量下就能牵拉组织较大的距离。直角楔形齿从安全压缩距离

牵拉能力最优的直角楔形齿钳头,钳齿数量在最大等效应力作用上差异并不明显(图3b),这可以理解为相同齿形结构在较小压缩量条件下,对组织施加的应力情况近似,即最大应力损伤能力相近。但图4b中不同齿数钳头所表现的牵拉能力有明显的齿数相关性,齿数越多牵拉能力越强,这就体现了不同齿数所作用于组织的钳制变形效果差异。

图5中钳头牵拉时,组织从钳齿间滑脱可以认为是单个钳齿将相邻右侧组织挤压后滑移的过程。钳头钳制组织的能力即可视为钳齿右侧组织因钳齿作用变形而具备的抵抗钳齿向右挤压的能力,钳齿右侧组织的应变大小及分布则反映了组织这一能力。

和不滑移牵拉距离方面,均显示突出的能力,这表示该钳齿形状在夹持中能发挥较好的性能。等腰楔形齿因其压缩时应力增长最慢,在最大安全牵拉距离后的两个测量单位内依然具有一定的安全牵拉能力,其牵拉过程应力增长占比明显高于其他3种齿形(表2),所以等腰楔形齿具有最宽的安全压缩距离。应力增长占比不同,更清晰地体现了不同钳齿作用效果的差异。各齿形最大安全牵拉时所受垂直压力见表2,齿形尖锐的齿作用较小的力便使组织应力达到安全峰值,这从力的角度说明了其安全性能较差。

4 结 语

钳齿形貌对钳头夹持组织性能影响明显,本文以最大等效应力为安全夹持判断标准,以不滑脱牵拉距离衡量钳头夹持性能,对比了相同齿数不同齿形钳头和不同齿数相同齿形钳头的夹持效果。钳齿尖锐更容易造成应力集中从而导致组织损伤,但夹持能力并非完全取决于夹持应力,应充分考虑钳齿对组织的钳制效果以判断不同齿形、齿数钳头所具备的安全夹持能力。有限元模拟应以更精确的模拟参数、更优化的模型进行腹腔镜夹钳设计分析,以期制造更优良的夹钳提供参照。

【参考文献】

- [1] MARUCCI D D, CARTMILL J A, WALSH W R, et al. Patterns of failure at the instrument-tissue interface[J]. J Surg Res, 2000, 93(1): 16-20.
- [2] ANNETTE W. Guideline implementation: minimally invasive surgery, Part 1[J]. AORN J, 2017, 106(1): 50-59.
- [3] CAI Z H, ZANG L, YANG H K, et al. Survey on laparoscopic total gastrectomy at the 11th China-Korea-Japan Laparoscopic Gastrectomy Joint Seminar[J]. Asian J Endosc Surg, 2017, 10(3): 259-267.
- [4] SÜMER B, ÖZİN M C, ERAY T, et al. The undamaged tissue grasping in a laparoscopic surgical grasper *via* distributed pressure measurement[J]. Tribol Int, 2017, 113: 330-337.
- [5] LI W, JIA Z G, WANG J, et al. Friction behavior at minimally invasive grasper/liver tissue interface[J]. Tribol Int, 2015, 81: 190-198.
- [6] CARTMILL J A, SHARKSHAFT A J, WALSH W R, et al. High pressures are generated at the tip of laparoscopic graspers[J]. Aust NZ J Surg, 1999, 69: 127-130.
- [7] 朱巍, 吕坤勇, 宋成利, 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, 28(3): 234-240.
- ZHU W, LYU K Y, SONG C L, et al. Mechanical analysis on laparoscopic instruments when contacting with biological tissues[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2014, 28(3): 234-240.
- [8] 王进, 李炜, 周仲荣. 腹腔镜手术夹持组织过程中安全性研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(1): 48-55.
- WANG J, LI W, ZHOU Z R. Security research of laparoscopic graspers during tissue damping operation [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2018, 35(1): 48-55.
- [9] HEIJNSDIJK E A, DE V H, DANKELMAN J, et al. Slip and damage properties of jaws of laparoscopic graspers[J]. Surg Endosc Other Interv Tech, 2004, 18(6): 974-979.
- [10] ADAMS M J, BRISCOE B J, JOHNSON S A. Friction and lubrication of human skin[J]. Tribol Lett, 2007, 26(3): 239-253.
- [11] 马力, 王冰瑞, 李炜, 等. 腹腔镜夹钳开窗设计对夹持稳定性影响研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 8-13.
- MA L, WANG R B, LI W, et al. Effect of fenestrations in laparoscopic grasper on the clamping stability [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 8-13.
- [12] DE S. The grasper-tissue interface in minimally invasive surgery: stress and acute indicators of injury [D]. Seattle: University of Washington, 2008.
- [13] ROSEN J, BROWN J D, DE S, et al. Biomechanical properties of abdominal organs *in vivo* and postmortem under compression loads [J]. J Biomech Eng, 2008, 130(2): 2037-2047.
- [14] 李明阳, 葛书晨, 艾辽元, 等. 新型内镜连续缝合器械的结构改进及分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(2): 137-142.
- LI M Y, GE S C, AI L Y, et al. Structural improvement and analysis of a novel endoscopic succession closing device[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2017, 32(2): 137-142.
- [15] CARTER F J, FRANK T G, DAVIES P J, et al. Measurements and modeling of the compliance of human and porcine organs[J]. Med Image Anal, 2001, 5(4): 231-236.
- [16] GAO Z, LISTER K, DESAI J P. Constitutive modeling of liver tissue: experiment and theory[J]. Ann Biomed Eng, 2010, 38(2): 505-516.
- [17] WEX C, ARNDT S, STOLL A, et al. Isotropic incompressible hyperelastic models for modelling the mechanical behaviour of biological tissues: a review[J]. Biomed Tech (Berl), 2015, 60(6): 577-592.
- [18] UNTAROIU C D, LU Y C. Material characterization of liver parenchyma using specimen-specific finite element models[J]. J Mech Behav Biomed, 2013: 11-22. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.05.013.
- [19] UMALE S, DECK C, BOURDET N, et al. Experimental mechanical characterization of abdominal organs: liver, kidney and spleen [J]. J Mech Behav Biomed, 2013: 22-33. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.07.010.
- [20] CHENG L, HANNAFORD B. Finite element analysis for evaluating liver tissue damage due to mechanical compression[J]. J Biomech, 2015, 48(6): 948-955.

(编辑:黄开颜)