

文章编号:1004-7220(2017)04-0342-06

大肠组织端端吻合的有限元建模与分析

艾辽元, 葛书晨, 许晶晶, 李明阳, 毛琳, 宋成利

(上海理工大学 医疗器械与食品学院, 现代微创医疗器械及技术教育部工程研究中心, 上海 200093)

摘要: **目的** 分析吻合钉成钉高度与组织损伤和吻合压力之间的关系, 为医生选择合适的吻合钉钉匣及成钉高度提供理论依据和指导, 提高手术的安全性。 **方法** 分析吻合钉与大肠组织交互作用, 并建立大肠端端吻合的有限元模型, 比较壁厚为 1.0 ~ 1.5 mm 的大肠组织在 4 种不同成钉高度时的应力分布以及径向平均应力变化。 **结果** 壁厚为 1.2、1.3、1.4、1.5 mm 的大肠组织, 在对应成钉高度为 1.0、1.1、1.2、1.5 mm 时, 吻合面径向平均应力分别为 56.0、58.6、59.7、57.3 kPa, 与最佳吻合压力 58.8 kPa 接近; 最大应力出现在吻合钉与组织接触位置, 其值分别为 2 783、1 750、1 940、2 030 kPa。 **结论** 吻合手术不能完全避免组织损伤, 应力集中一般存在于组织与吻合钉接触的区域; 将组织压缩 50% ~ 60% 时成钉, 吻合效果最优。

关键词: 端端吻合; 吻合器; 组织损伤; 组织压缩; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.04.008

Finite element modeling and analysis on end-to-end anastomosis of the large intestine

AI Liao-yuan, GE Shu-chen, XU Jing-jing, LI Ming-yang, MAO Lin, SONG Cheng-li

(Shanghai Institute for Minimally Invasive Therapy, School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: **Objective** To analyze the relationship of closed staple height with tissue damage and compression pressure, so as to provide theoretical references and guidance for the surgeon to choose the appropriate staple cartridge and height, as well as improve the safety of operation. **Methods** The finite element model of stapled colorectal end-to-end anastomosis was established based on analysis of staple-tissue interaction. Large intestine tissues with different wall thicknesses (1.0-1.5 mm) were compressed by closed staples with 4 different height to compare changes in stress distributions and average radial pressure. **Results** When the tissues were compressed by closed staple with height of 1.0, 1.1, 1.2 and 1.5 mm, respectively, the average radial stress of compressed tissues with wall thicknesses of 1.2, 1.3, 1.4, and 1.5 mm were 56.0, 58.6, 59.7 and 57.3 kPa, respectively, which was close to the optimal compression pressure. Stress concentrations were found in contact area of the staple and tissues, with the maximum stress being 2 783, 1 750, 1940 and 2 030 kPa, respectively. **Conclusions** Tissue damage cannot be completely avoided in anastomotic surgery, and stress concentration is generally located near contact region of the staple and tissues. The optimal closed staple height ranges in 50%-60% of the uncompressed tissue height.

Key words: End-to-end anastomosis; Stapler; Tissue damage; Tissue compression; Finite element analysis

收稿日期:2016-09-05; 修回日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(81171484,51175345), 中国博士后科学基金(2016M590368)。

通信作者:宋成利,教授,E-mail: csong@usst.edu.cn。

吻合器较传统手工缝合而言,具有操作简单、手术时间短、术后恢复快等优点,因而在临床中被广泛使用。目前,吻合器主要应用于临床消化道重建手术中,其工作原理是以机械方式钉合、连接拟吻合的胃肠组织。

由于机械吻合器的吻合效果受到多种因素影响(如:吻合钉与组织的交互作用、吻合组织的厚度、吻合钉钉匣的选择、预压时间及吻合钉排列与间距等)^[1-6],导致其在临床使用时仍然不能完全避免吻合口漏、出血和感染等术后并发症的发生^[7-9]。现有研究都未就组织厚度、吻合钉型号及成钉高度得出一个可以给医生提供指导的参考标准。在实际手术中,医生对吻合钉钉匣的选择主要依靠其主观经验进行判断,但往往由于缺少判断的依据和标准,致使在吻合过程中组织被钉合过紧而出现组织缺血、炎症或钉合过松而出现组织出血、吻合口漏等问题^[3]。

本文着重研究吻合钉成钉高度对组织损伤以及吻合压力的影响。在分析吻合过程中吻合钉与组织交互作用的力学特性基础上,以结直肠吻合手术为例,通过有限元方法研究不同壁厚大肠组织在不同成钉高度下的受力情况,分析大肠组织厚度与最佳成钉高度之间的对应关系。

1 材料与方法

1.1 机械吻合的力学模型

如图1所示,吻合钉与组织的交互作用过程可以分为吻合钉预穿刺组织、刺入组织、刺破组织、接触钉砧变形、二次预穿刺组织和二次刺入软组织6个阶段。

在吻合钉与软组织交互作用的过程中,吻合钉的受力模型与针穿刺软组织的力学模型类似^[10-11],可表示为:

$$f_{\text{staple}}(x) = f_{\text{stiffness}}(x) + f_{\text{friction}}(x) + f_{\text{cutting}}(x) + f_{\text{anvil}}(x) + f_{\text{afriiction}}(x) + f_{\text{tissue}}(x) \quad (1)$$

式中: x 为吻合钉钉尖的位移; $f_{\text{staple}}(x)$ 为吻合钉所受到的力; $f_{\text{stiffness}}(x)$ 为背膜阻力; $f_{\text{friction}}(x)$ 为吻合钉与软组织之间的摩擦力; $f_{\text{cutting}}(x)$ 为切割力; $f_{\text{anvil}}(x)$ 为钉砧对吻合钉的作用力; $f_{\text{afriiction}}(x)$ 为钉砧与吻合钉之间的摩擦力; $f_{\text{tissue}}(x)$ 为组织对吻合钉的压力。

在吻合过程中,吻合钉穿刺软组织的力要远小于吻合钉与钉砧接触发生屈服变形的力。组织在吻

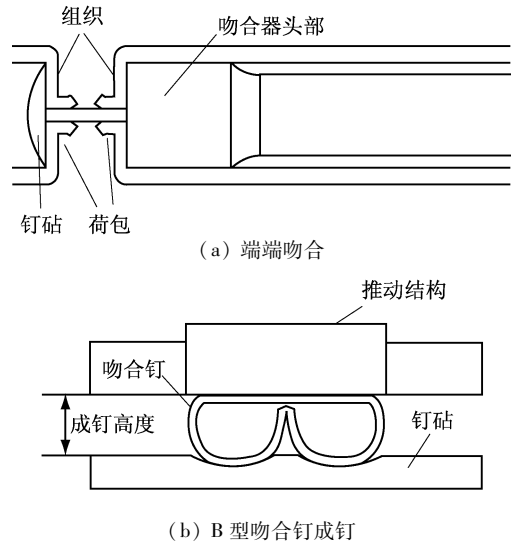


图1 端端吻合及成钉示意图

Fig.1 Schematic of colorectal end-to-end anastomosis and staple formation (a) Colorectal end-to-end anastomosis, (b) B-shape staple formation

合钉穿刺过程中主要受到吻合钉的切割力、吻合钉与组织之间的摩擦力以及组织与吻合钉之间的挤压力,这些作用力对吻合面径向受力影响不大。并且吻合钉为钛钉,直径约为0.27 mm,相对于组织面积来说非常小,故吻合钉的穿刺过程对组织径向平均受力影响较小。本文着重研究不同钉高的吻合钉在成型之后吻合面应力分布以及径向平均应力的变化情况,故在吻合钉与组织的交互作用中省略吻合钉穿刺组织并成型的过程,将B形吻合钉简化为矩形^[12](见图2),并根据该简化方法建立有限元模型。

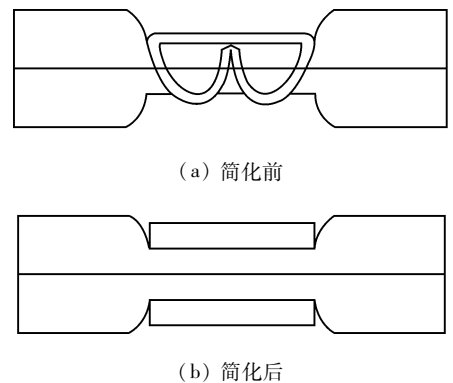


图2 吻合钉成钉模型简化示意图

Fig.2 Schematic diagram of simplification of staple B-shape formation (a) Original model, (b) Simplified model

1.2 大肠组织端端吻合的有限元分析

以 Covidien (Medtronic 公司, 美国) 的 The DST™ Series EEA™ 环形吻合器为研究对象, 其头部外径为 25 mm, 吻合钉钉宽为 4.8 mm, 直径为 0.27 mm。采用 Solidworks 2014 建立模型, 并采用 ABAQUS 6.14 进行有限元仿真分析, 所建立的模型如图 3 所示。吻合钉钉数为 2, 内、外侧吻合钉内切圆直径分别为 20.0、22.5 mm。吻合器每一排都有 11 个吻合钉均布排列。为减少计算时间和计算量, 建立周向 360/11 的模型进行计算, 其中包括一个完整的吻合钉和两个吻合钉的 1/2。根据文献报道, 人体大肠的厚度范围为 0.7 ~ 1.6 mm^[13], 故选取大肠壁厚变化范围为 1.0 ~ 1.5 mm, 以 0.1 mm 为间隔分别建立不同厚度的大肠模型, 计算其在 4 种常用成钉高度 ($H=1.0、1.5、2.0、2.5$ mm) 下的受力情况^[1]。

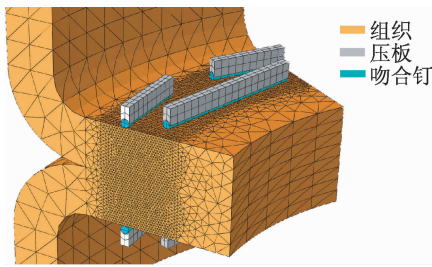


图3 结直肠端端吻合有限元模型

Fig. 3 Finite element model of colorectal end-to-end anastomosis

大肠组织采用三维 Ogden 不可压缩超弹模型^[14], 其应变势能表达式为:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (2)$$

式中: $\lambda_1、\lambda_2、\lambda_3$ 分别表示主应变伸长率; μ_i 和 α_i 为材料常数。根据文献^[15]得知, 猪结肠的拟合系数 $\mu_1 = 8.3$ kPa, $\mu_2 = 0.2$ kPa, $\mu_3 = 6.2$ kPa, $\alpha_1 = 7.625$, $\alpha_2 = 13.875$, $\alpha_3 = 7.625$; 吻合钉为钛钉, 其弹性模量为 96 GPa, 泊松比为 0.36; 压板的材料为 304 不锈钢, 弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3。吻合钉与组织接触的摩擦系数为 0.1。

对组织进行四面体网格划分, 单元类型为 C3D10M, 并对吻合钉施压的区域细化网格。吻合钉以及压板采用六面体网格划分, 单元类型为

C3D8R。为模拟吻合钉击发成钉过程, 采用动态分析步进行分析计算, 吻合钉运动速度为 100 mm/s。吻合钉的运动由压板提供, 给上下侧压板分别添加 50 mm/s 纵向速度载荷, 使其相向运动。限制组织两侧断面、吻合钉以及压板除轴向移动以外的其他的自由度。

2 结果

2.1 组织吻合面径向应力分布

如图 4 所示, 在同一成钉高度下, 吻合面径向平均应力随着组织厚度的增加而呈现递增的趋势。而且随着组织厚度的增加, 吻合面径向应力差值越大; 同一厚度的组织, 随着成钉高度的降低, 其吻合面径向应力差值逐渐增大, 即吻合面应力分布不均匀性随着组织厚度的增加和成钉高度的降低而递增。

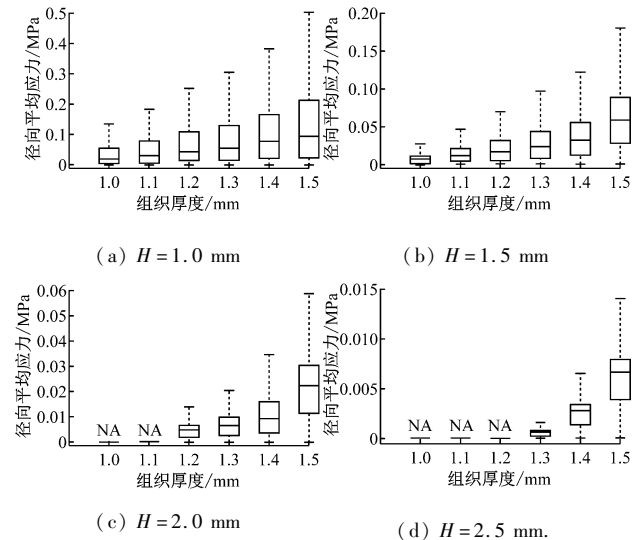


图4 不同厚度组织在不同成钉高度下的径向应力

Fig. 4 Radial stresses of tissues with different thickness at different closed staple height (a) $H=1.0$ mm, (b) $H=1.5$ mm, (c) $H=2.0$ mm, (d) $H=2.5$ mm

从图 5 可以看出, Von Mises 等效应力范围为 149 Pa ~ 19.1 MPa。当吻合钉作用于大肠组织上时, 吻合钉与大肠组织接触的地方存在应力集中; 随着成钉高度的降低, 应力逐渐增大, 吻合面应力差值越大, 应力分布越不均匀。在成钉高度为 2.5、2.0、1.5 和 1.0 mm 时, 最大应力分别为 69、110、2 030、18 700 kPa。

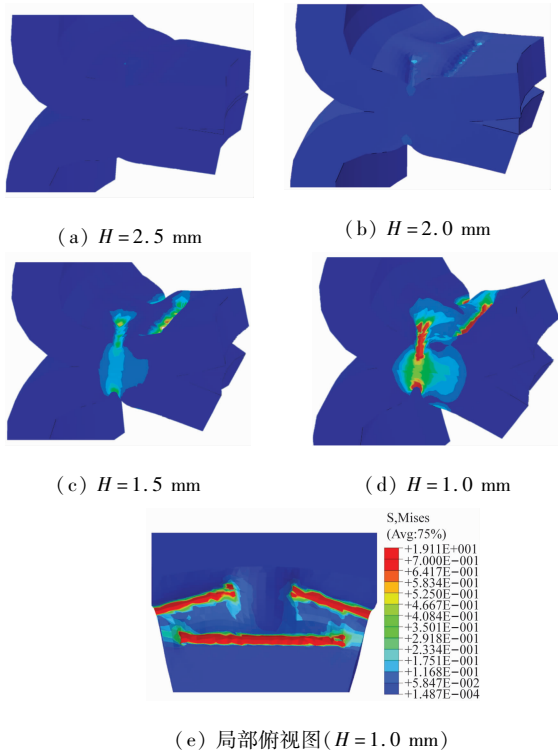


图5 厚度为 1.5 mm 的组织在不同成钉高度下的应力分布

Fig.5 Von Mises stress distributions of tissues with thickness of 1.5 mm at different closed staple height (a) $H = 2.5 \text{ mm}$, (b) $H = 2.0 \text{ mm}$, (c) $H = 1.5 \text{ mm}$, (d) $H = 1.0 \text{ mm}$, (e) Partial enlarged top-view drawing ($H = 1.0 \text{ mm}$)

2.2 吻合面径向平均应力分布

由吻合面径向平均应力(P)与成钉高度(H)以及组织厚度(T)之间的关系可知,吻合面径向平均应力随着成钉高度的降低出现递增的趋势;随着组织厚度的增加,同样出现递增的趋势(见图6)。

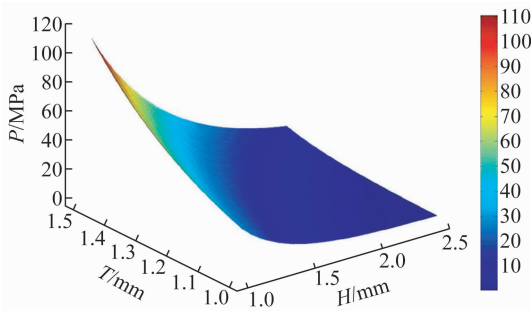


图6 吻合面径向平均应力与成钉高度和组织厚度之间的关系

Fig.6 Relationship among the average radial stress and the tissue thickness and closed staple height

械设计生产采用的标准,故对径向平均应力接近 58.8 kPa 的数据进行统计分析,统计结果如表 1 所示。

表1 计算结果分析

Tab.1 Analysis of the computed results

单层组织厚度/mm	成钉高度/mm	径向平均应力/kPa	吻合组织压缩比/%
1.2	1.0	56.0	58.3
1.3	1.1	58.6	57.7
1.4	1.2	59.7	57.2
1.5	1.5	57.3	50.0

3 讨论

吻合器目前还没有统一并且安全的使用规范。医生只能凭借器械制造商提供的产品使用说明、培训以及大量的临床实践经验选择合适的吻合钉钉匣进行手术操作。然而这些产品使用说明的判断标准模糊,在临床实践中,医生很难做到准确地判断组织的厚度以及组织的压缩特性^[9]。本文在分析吻合钉与组织交互作用的基础上,建立大肠端端吻合的有限元模型,分析不同厚度组织在成钉高度变化时的径向应力分布以及平均应力变化,探讨吻合压力与组织厚度、成钉高度之间的关系。

在吻合过程中,医生既要保证吻合钉能正确弯曲形成 B 型钉,同时达到足够的吻合压力以保证不会出血以及泄漏,还要减少压力对组织造成的损伤。研究表明,在结直肠外科手术中,吻合口漏的发生率为 0% ~ 30%,这可能导致二次手术,增加住院时间,甚至导致发病或者死亡^[16]。而发生吻合口漏的原因主要是吻合钉钉高选择不当,致使吻合压力过小。吻合压力的安全范围至今还没有定论。Baker 等^[9]研究表明,对于胃部组织,当吻合压力达到 78.4 kPa 时,能实现组织的闭合以及止血,且没有明显的组织损伤;对于肠和食管,最佳的吻合压力为 58.8 kPa。

由计算结果得知,在吻合过程中,吻合钉与组织接触区域的应力明显高于其他区域,即该区域存在应力集中。这主要是由于吻合钉尺寸相对于组织面积来说非常小,并且吻合钉对组织的压力主要集中

实验测得的最佳吻合压力为 58.8 kPa^[9],也是器

在吻合钉的下方,而其他区域由于没有吻合钉之间作用,故受到的压力相对来说非常小。壁厚分别为1.2、1.3、1.4和1.5 mm的大肠组织,当吻合面径向压力接近最佳吻合压力时,对应的径向最大应力分别为2 783、1 750、1 940和2 030 kPa。现有研究表明,180 kPa压力对组织的作用是安全的,压力超过220 kPa会造成组织的炎症以及细胞的凋亡^[17-18]。本文计算结果中的最大压力均大于安全压力值,故吻合器在安全使用的情况下,吻合钉与组织接触的周围会发生局部组织损伤。过高的压力会造成细胞凋亡,引起组织炎症,而炎症的出现又会使得修复期延迟,影响胶原蛋白的沉积和组织愈合,从而对吻合效果产生影响。因此,医生需要选择合适的成钉高度,或使用吻合钉加强材料^[19],使得吻合面应力分布更加均匀,减小最大应力,从而降低组织损伤程度。

吻合钉尺寸对并发症发生率有非常大的影响^[20]。医生在选择吻合钉钉匣时,需要同时考虑吻合面压力、吻合钉钉高、组织厚度、组织压缩特性、组织类型等因素^[1]。本文在分析吻合面径向平均应力与成钉高度以及组织厚度关系的基础上,提出不同厚度大肠组织的最佳成钉高度范围,为医生在选择钉匣时提供参考依据。根据仿真结果,拟吻合组织厚度/成钉高度分别为3.0/1.5 mm、2.8/1.2 mm、2.6/1.1 mm、2.4/1.0 mm时,径向平均应力最接近最佳吻合压力(58.8 kPa),此时对应的成钉高度即为该厚度大肠组织端端吻合时的最佳成钉高度。根据Myers等^[3]的研究结果,只有吻合器将组织压缩到压力超过41.37 kPa时,才能击发吻合钉,而有关最大吻合压力的范围还没有定论。通过进一步对数据的拟合分析表明,当成钉高度与拟吻合组织厚度比在40%~50%范围内时,径向平均应力接近最佳吻合压力且大于41.37 kPa,能够实现大肠吻合面的闭合以及止血;此时的成钉高度范围即为最佳成钉高度范围,可以作为医生选择吻合钉钉匣以及确定成钉高度的依据。

4 结论

本文在分析吻合钉与组织交互作用的基础上建立大肠端端吻合的有限元模型,分析大肠组织在吻合钉作用下的受力情况,初步探索成钉高度、组织厚

度与吻合压力之间的关系。根据有限元计算结果,对影响吻合效果的3个因素(组织厚度、组织损伤以及成钉高度)进行研究,并针对不同厚度的组织给出最佳的成钉高度范围,为医生根据组织厚度选取不同高度的吻合钉提供理论指导,有利于提高手术的安全性,同时为以后吻合器的设计改进提供帮助。

参考文献:

- [1] CHEKAN E, WHELAN RL. Surgical stapling device-tissue interactions: What surgeons need to know to improve patient outcomes [J]. *Med Devic*, 2014, 7: 305-318.
- [2] JACOBSEN H, DALENBÄCK J, EKELUND M, *et al*. Tensile strength after closure of mesenteric gaps in laparoscopic gastric bypass: Three techniques tested in a porcine model [J]. *Obes Surg*, 2012, 23(3): 320-324.
- [3] MYERS SR, Rothermel WS, SHAFFER L. The effect of tissue compression on circular stapler line failure [J]. *Surg Endo*, 2011, 25(9): 3043-3049.
- [4] NAKAYAMA S, HASEGAWA S, NAGAYAMA S, *et al*. The importance of precompression time for secure stapling with a linear stapler [J]. *Surg Endo*, 2011, 25(25): 2382-2386.
- [5] SOZUTEK A, COLAK T, DAG A, *et al*. Comparison of standard 4-row versus 6-row 3-D linear cutter stapler in creation of gastrointestinal system anastomoses: A prospective randomized trial [J]. *Clinics*, 2012, 67(9): 1035-1038.
- [6] CHIKAMOTO A, HASHIMOTO D, IKUTA Y, *et al*. Effects of the closing speed of stapler jaws on bovine pancreases [J]. *Surg Endo*, 2014, 28(1): 336-340.
- [7] WHEELESS CR, SMITH JF. A comparison of the flow of iodine 125 through three different intestinal anastomoses: Standard, gambee, and stapler [J]. *Obst Gyn*, 1983, 62(4): 513-518.
- [8] SCHROCK TR, DEVENNEY CW, DUNPHY JE. Factor contributing to leakage of colonic anastomoses [J]. *Ann Surg*, 1973, 177(5): 513-518.
- [9] BAKER RS, FOOTE J, KEMMETER P, *et al*. The science of stapling and leaks [J]. *Obes Surg*, 2004, 14(10): 1290-1298.
- [10] SIMONE C, OKAMURA AM. Modeling of needle insertion forces for robot-assisted percutaneous therapy [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington: IEEE, 2002: 2085-2091.
- [11] 齐迎春, 丛茜, 齐欣. 仿生减阻针头穿刺过程中力学行为分

- 析[J]. 医用生物力学, 2012, 27(4): 427-431.
- QI YX, CONG Q, QI X. Mechanical behavior of bionic drag reduction needle during puncturing process [J]. J Med Biomech, 2012, 27(4): 427-431.
- [12] NOVÁČEK V, TRÀN TN, KLINGE U, et al. Finite element modelling of stapled colorectal end-to-end anastomosis: Advantages of variable height stapler design [J]. J Biomech, 2012, 45(15): 2693-2697.
- [13] HABER HP, STERN M. Intestinal ultrasonography in children and young adults; Bowel wall thickness is age dependent [J]. J Ultras Med, 2000, 19(5): 315-321.
- [14] OGDEN RW. Large deformation isotropic elasticity: On the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids [J]. Proc Roy Soc Lond, 1972, 326(2): 565-584.
- [15] TRKÁN TN, NOVÁČEK V, TOLBA R, et al. Experimental and computational approach to study colorectal anastomosis [C]//Proceedings of the XXIII Congress of the International Society of Biomechanics. Brussels: [s. n.], 2011.
- [16] KINGHAM TP, PACHTER HL. Colonic anastomotic leak; Risk factors, diagnosis, and treatment [J]. J Am Coll Surg, 2009, 208(6): 269-278.
- [17] DE S, ROSEN J, DAGAN A, et al. Assessment of tissue damage due to mechanical stresses [J]. Int J Robot Res, 2007, 26(11-12): 1159-1171.
- [18] 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, 29(3): 234-240.
- ZHU W, LV KY, SONG CL, et al. Mechanical analysis on laparoscopic instruments when contacting with biological tissues [J]. J Med Biomech, 2014, 29(3): 234-240.
- [19] NOCCA D, GAYREL X, LOUREIRO M, et al. Evaluation of clinical performance of staple line buttressing seamgard for prevention of early complications in sleeve gastrectomies in a specially susceptible population [J]. Obes Surg, 2015, 25: S115-S115.
- [20] SAKRAN N, ASSALIA A, STERNBERG A, et al. Smaller staple height for circular stapled gastrojejunostomy in laparoscopic gastric bypass: Early results in 1,074 morbidly obese patients [J]. Obes Surg, 2011, 21(2): 238-243.

《医用生物力学》杂志征稿启事

《医用生物力学》杂志由中华人民共和国教育部主管、上海交通大学主办,是国内唯一一本公开发行,以积极反映生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、生、理、工各学科相互了解和合作为目的的学术性刊物。报道内容主要包括生物力学领域中有关力学生物学、器官-组织生物力学、细胞-亚细胞-分子生物力学、感觉系统生物力学、骨骼肌肉系统生物力学、航空航天生物力学、颌面口腔生物力学、呼吸系统生物力学、康复工程生物力学、心血管系统生物力学、血液流变学、医用材料生物力学、运动医学生物力学等的研究论文。本刊为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊);美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、荷兰《文摘与引文数据库》来源期刊;2015年入选北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》(2014年版)。

本刊为双月刊,每双月25日出版,16开本,96页,国内统一连续出版物号CN 31-1624/R,国际标准连续出版物号ISSN 1004-7220;定价每期15.00元,全年90.00元。本刊欢迎有关生物力学基础和临床研究的论著、文献综述。除中文稿件外,也欢迎具有创新性的英文稿件。欢迎广大作者踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号200011

电话:(021)53315397;传真:(021)63137020;电子信箱:shengwulixue@163.com

网址:www.medbiomechanics.com, www.mechanobiology.cn