

文章编号: 1004-7220(2022)05-0946-06

腹腔镜手术悬吊系统的设计与仿真分析

高芳¹, 崔海坡¹, 周琪², 王礼国², 安明晖¹, 何应荣¹

(1. 上海理工大学 上海介入医疗器械工程技术研究中心, 上海 200093; 2. 上海市杨浦区市东医院 胸外科, 上海 200438)

摘要:目的 基于现有的气腹装置,在低气压的前提下,设计一款用于微创手术的新型悬吊系统,以暴露更多手术视野,便于手术顺利进行。**方法** 利用 Solidworks 软件完成悬吊系统的结构设计,并基于有限元仿真分析技术,研究医用不锈钢、钛合金 Ti6Al4V、钛合金 Ti6Al7Nb 和纯钛 4 种不同夹子制作材料以及尼龙 (polyamide-6, PA6)、涤纶、聚丙烯 (polypropylene, PP) 3 种不同中间平面结构制作材料对悬吊系统使用性能的影响。**结果** 4 种不同材料的夹子在夹持组织过程中,组织的形变量均较低,不会出现所夹持组织从夹子中滑脱的现象。就应力而言,选用医用不锈钢材料时,夹子及其夹持组织的应力均最低;对于中间平面结构的制作材料而言,当选取涤纶材料时,在悬吊系统工作过程中,中间平面结构会在外载荷作用下发生破坏;当选用 PP 材料时,中间平面结构会发生永久变形,且形变量最高,不利于临床手术的进行。**结论** 选择医用不锈钢作为夹子的制作材料为最佳。不宜选择涤纶作为中间平面结构的制作材料,选择 PA6 作为中间平面结构的制作材料为最优。

关键词: 悬吊系统; 腹腔镜手术; 组织形变

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.05.027

Design and Simulation Analysis of Suspension System for Laparoscopic Surgery

GAO Fang¹, CUI Haipo¹, ZHOU Qi², WANG Ligu², AN Minghui¹, HE Yingrong¹

(1. Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Devices, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Thoracic Surgery, Shidong Hospital of Shanghai Yangpu District, Shanghai 200438, China)

Abstract: **Objective** Based on the existing pneumoperitoneum device, a new suspension system for minimally invasive surgery was designed under the condition of low pressure, so as to expose more surgical vision and facilitate the smooth operation. **Methods** Structure design of the suspension system was completed with Solidworks software. Based on the finite element simulation analysis technology, the effects of four different clamp materials, i. e. medical stainless steel, Ti6Al4V, Ti6Al7Nb and pure titanium, and three different mid-plane structure materials, i. e. nylon (PA6), polyester and polypropylene (PP), on performance of the suspension system were studied. **Results** In the process of clamping tissue by clamps with four different materials, the tissue deformation was lower. The gripped tissue did not slip out of the clamp. The stress of the clamp and its holding tissues were the lowest when the medical stainless steel material was selected. For the material of the mid-plane structure, when polyester was selected, the mid-plane structure would be destroyed under external loading in working process of the suspension system. When PP material was selected, the mid-plane structure would have the largest deformation, which was not conducive to the clinical operation. **Conclusions** The best material for clamp is medical stainless steel. It is not suitable to choose polyester as the material of the mid-plane structure, and choosing PA6 as the material of the mid-plane structure is the best.

Key words: suspension system; minimally invasive surgery; tissue deformation

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-07-29

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (19ZR1435300), 上海工程技术研究中心资助项目 (18DZ2250900)

通信作者: 崔海坡, 特聘教授, E-mail: h_b_cui@163.com

随着微创手术在临床上的广泛应用,世界各地的外科医生致力于研究腹腔镜治疗外科疾病的新方法。其中,手术器械和技术的创新是微创手术中保障患者安全的重要工具^[1]。目前,临床上腹腔镜手术多是以 CO₂ 作为膨腹介质^[2]。常规的气腹腹腔镜手术,充入 CO₂ 的压力一般为 13~15 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa),以创造暴露视野和易于操作的手术环境,但气腹装置可能对血液循环、呼吸等生理功能产生影响。常规腹腔镜手术患者会出现心率增快、血压升高、心排量降低、气道压力升高、血氧分压降低和限制性通气等功能障碍^[3-4]。虽然机体对 CO₂ 吸收后容易排出,但是通过肺排出并不是很迅速。同时,CO₂ 气腹可造成腹腔内压力升高、膈肌上抬、胸腔内压力升高、气道阻力明显升高和肺顺应性下降等问题^[5]。此外,气腹式器械的出入、出血及冲洗时的吸引、排烟等均可造成腹腔内气体的漏出,从而影响手术操作视野,延长手术进程^[6]。

悬吊式免气腹腹腔镜手术依靠腹壁悬吊形成手术空间,腹内压与大气压相同,不影响膈肌运动,不增加心血管的阻力负荷,对呼吸和循环干扰小^[7-8]。由于免气腹可减少 CO₂ 气体对机体的影响,故更适合心肺功能不全的患者^[9]。在无气腹腹腔镜检查过程中,腹腔内空间是通过使用内提方式而不产生 CO₂ 气腹来创造^[10]。研究发现,有些手术选用单孔免气腹手术暴露装置,其缺点是手术空间只有局部手术视野,并且只能进行一些简单的手术,例如胆囊和阑尾切除等^[11]。另有手术通过提拉前壁来制造手术空间,缺点是腹壁向中间聚拢,挤压肠管向中间聚集,反而使得手术空间狭窄^[12]。还有部分手术通过缝线把前腹壁悬吊起来,缺点是悬吊力不足而且操作复杂^[13]。由于手术操作暴露的视野不如气腹法腹腔镜开阔,尤其是老年人的腹壁肌肉相对松弛,悬吊后腹壁难以形成“帐篷状”有效空间,故腹腔内遮挡手术视野成为手术障碍^[14]。

基于上述分析,为了合理、有效地暴露手术操作视野,并且对组织的损伤程度最小,本文设计一款在低气腹状态下使用的新型悬吊系统,其优点是在低气腹压(人工气腹压力为 10 mmHg)下患者机体功能受到的影响最小,且术后并发症发生率较低。再配合使用悬吊系统,可使手术操作者获得适

宜的手术操作空间。针对所设计的新型悬吊系统,基于 ABAQUS 有限元仿真分析技术,本文研究医用不锈钢、钛合金 Ti6Al4V、钛合金 Ti6Al7Nb 和纯钛 4 种不同夹子制作材料以及尼龙 (polyamide-6, PA6)、涤纶、聚丙烯 (polypropylene, PP) 3 种不同中间平面结构制作材料对悬吊系统使用性能的影响,从而为进一步提升临床上微创手术的便利性提供参考。

1 材料与方法

1.1 几何模型

所设计的悬吊系统由曲线圆体缝合针、夹子以及中间平面结构 3 个部分组成(见图 1)。在夹子尾端旋转轴的中间部位加工 1 个槽,将中间平面结构的一端通过旋转轴的槽与夹子相连接。缝合针尾端有针孔,可利用该针孔将中间平面结构与缝合针连接在一起。夹子夹住肠组织,缝合针在气腹充气后钩住腹膜内壁,从而使中间平面结构 4 个角撑起并拖住腹腔内遮挡手术视野的各种软组织,以更好地暴露手术视野。

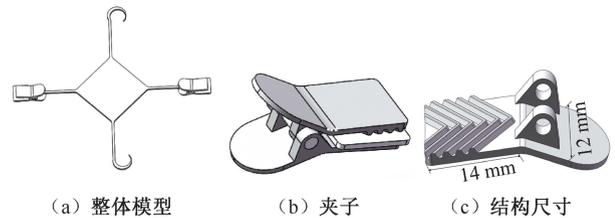


图 1 悬吊系统

Fig. 1 Suspension system (a) The whole model, (b) Clamp, (c) Structure dimension

1.2 网格划分

有限元分析采用 ABAQUS 6.14, 整套悬吊系统采用六面体网格单元 C3D8R 进行网格划分,夹子所夹持的组织属于超弹材料,采用 C3D8H 单元进行网格划分。为了提高计算精度同时节省计算时间成本,对于悬吊系统中的弯曲部位以及夹子转动轴的轴孔部位网格划分较密。最终有限元模型共划分 86 655 个单元,包含 165 418 个节点。

1.3 材料参数

为比较不同材料对悬吊系统性能的影响规律,夹子选择 4 种制作材料,分别是医用不锈钢、钛合金 Ti6Al4V、钛合金 Ti6Al7Nb、纯钛;基于悬吊系统

的预期功能,中间平面结构的材料选择尤为重要,不仅要满足支撑软组织的作用,还要满足下述 3 点要求:① 具有良好的生物相容性;② 具有良好的柔顺性;③ 具有较好的韧性。基于上述要求,本文中中间平面结构选择 3 种常用的生物医用高分子材料,分别是 PA6、涤纶、PP。在分析不同夹子制作材料对悬吊系统性能的影响规律时,固定中间平面结构的材料为 PA6;在分析不同平面结构的制作材料对悬吊系统性能的影响规律时,固定夹子的材料为医用不锈钢。各类材料的性能参数如表 1 所示^[15-19]。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material properties

| 材料名称 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/(g·cm ⁻³) |
|--------------|----------|-------|--------------------------|
| 医用不锈钢 | 200 | 0.300 | 7.850 |
| 钛合金 Ti6Al4V | 113.8 | 0.330 | 4.428 |
| 钛合金 Ti6Al7Nb | 105 | 0.334 | 4.520 |
| 纯钛 | 110 | 0.350 | 4.520 |
| 尼龙(PA6) | 2 620 | 0.340 | 1.120 |
| 涤纶 | 17 | 0.300 | 1.390 |
| 聚丙烯(PP) | 896 | 0.410 | 0.890 |

悬吊系统在工作过程中需要夹持腹腔内壁的薄膜组织,该组织的材料模型采用三维 Ogden 不可压缩超弹模型^[20],其应变势能表达式为:

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

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示 3 个方向上的主应变伸长率; μ_i 和 α_i 为材料常数, $\mu_1 = 8.3$ kPa, $\mu_2 = 0.2$ kPa, $\mu_3 = 6.2$ kPa, $\alpha_1 = 7.625$, $\alpha_2 = 13.875$, $\alpha_3 = 7.625$; 组织接触的摩擦因数为 0.1^[21]。

1.4 载荷与边界条件

1.4.1 载荷条件 夹子的夹头部分通过转动轴连接,利用夹齿部位夹住组织并进行预紧力设置。考虑到组织的承载能力及所需的夹持力,其预紧力设定为 6.8 N。考虑到手术中为了暴露手术视野需要托起软组织的重量,在悬吊系统中间平面结构的中心位置上施加 12 N 垂直向下的载荷。

1.4.2 边界条件 由于在使用该悬吊系统的过程中,需要先用夹子夹住组织,然后用中间平面结构托起腹腔内的软组织,故边界条件分为两步:第 1 步,将组织的最外侧端面、夹子转动轴两侧端面和中间平面结构的端面分别固定;第 2 步,以全局坐标系为准,在转动轴两侧端面设置 X 轴、Y 旋转轴和

Z 旋转轴为固定约束。

2 结果

2.1 不同夹子材料对悬吊系统的影响

计算分析表明,对于本文所选的 4 种不同夹子制作材料,悬吊系统各部分的应力分布具有类似规律。本文仅以医用不锈钢材料为例,对有限元仿真结果进行分析。图 2 所示为悬吊系统整体结构及夹子的应力分布情况。在悬吊系统工作过程中,整体结构的最大应力区域位于中间平面结构与缝合针连接的部位,最大应力为 38.29 MPa,该应力值低于中间平面结构制作材料 PA6 屈服强度(103.6 MPa),故可安全使用。此外,夹子的最大应力区域位于转轴部位,推测在夹子夹紧组织的过程中,转动轴受到上下两个夹子转动时的剪切力。夹子的最大应力约为 2.77 MPa,远小于医用不锈钢的屈服强度。综合上述分析可知,在悬吊系统工作过程中,其组成部件均可正常完成悬吊腹腔内软组织功能,不会发生破坏现象。

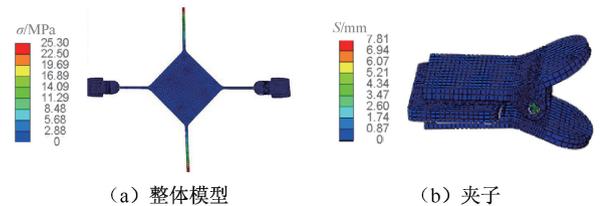


图 2 应力云图

Fig. 2 Stress nephogram (a) The whole model, (b) Clamp

除需对悬吊系统进行分析外,如果悬吊系统所夹持的生物组织受到较高的应力,则会导致组织产生损伤。因此,还需对悬吊系统工作过程中生物组织的应力及形变量进行分析。从所夹持组织的有限元仿真分析结果可知,当夹子的制作材料选取医用不锈钢时,所夹持组织的最大应力约为 0.22 MPa,低于腹腔内壁薄膜组织的承载能力(6.2 MPa),故薄膜组织不会被夹持破坏。此外,组织形变量较高的区域主要集中在靠近夹子转轴的部位,最大形变量约为 3.8 mm,在悬吊系统工作过程中所产生的变形较小,不会从夹子中滑脱(见图 3)。

为了更直观地比较不同夹子制作材料对夹子及所夹持组织的应力和形变量的影响,绘制相应的关系曲线(见图 4)。对于 4 种不同的夹子制作材

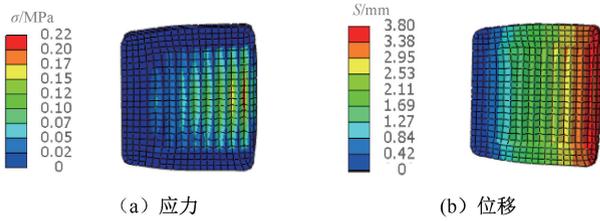


图3 所夹持组织仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the clamped tissue (a) Stress, (b) Displacement

料,当选取医用不锈钢材料时,夹子在夹持组织过程中,夹子本身的应力以及所夹持组织的应力均最

低,而选取纯钛时,所夹持组织的应力最高(相比医用不锈钢材料高出了近1倍)。在使用悬吊系统工作过程中,所夹持组织的应力越小,组织损伤的概率越低,从而可更好地保持其完整性。因此,从保护组织的角度出发,选择医用不锈钢作为悬吊系统的夹子制作材料为最佳。此外,4种不同材料的夹子在夹持组织过程中,组织的形变量无明显差异,且从整体分析结果来看,组织的形变量均较低,不会出现所夹持组织从夹子中滑脱的现象,即夹子具有足够的夹持力。综合上述分析结果,夹子的制作材料选择医用不锈钢为最佳。

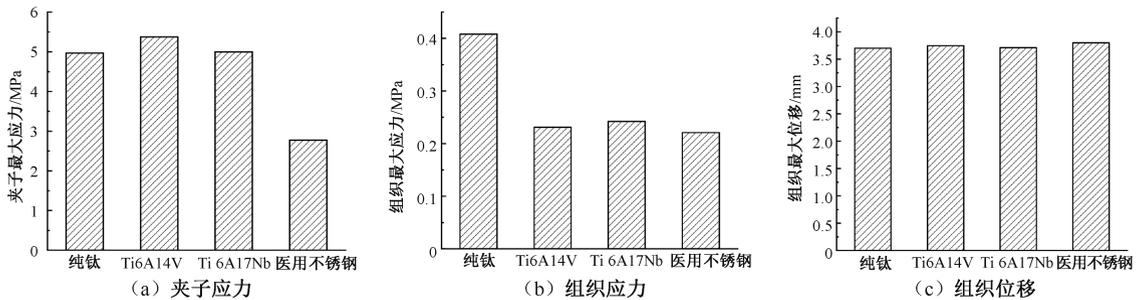


图4 不同夹子制作材料对各部分应力及位移的影响

Fig. 4 Influence of different clamp materials on stress and displacement of each part (a) Clamp stress, (b) Tissue stress, (c) Tissue displacement

2.2 不同材料中间平面结构对悬吊系统的影响

经有限元分析结果表明,在其他条件均相同的情况下,不同材料的中间平面结构,其应力及形变量分布有类似的规律,故以PP材料为例,对仿真结果进行分析。图5为悬吊系统工作过程中,中间平面结构的应力和形变量云图。中间平面结构的最大应力区域主要集中在连接腹壁的两端,最大应力约为25.3 MPa,虽然该值小于PP材料的拉伸强度(27.6 MPa),但高于PP材料的屈服强度

(23.9 MPa),即悬吊系统在工作过程中,中间平面结构虽然不会发生破坏,但会产生永久变形。从中间平面结构的形变量云图可以看出,其最大的形变量变化区域主要集中在结构的中心部位,最大形变量约为7.81 mm,总体而言形变量不高,基本能够完成悬吊腹腔内软组织的功能。

为进一步比较不同材料的中间平面结构对悬吊系统功能的影响,绘制相应的关系曲线(见图6)。当中间平面结构的制作材料为涤纶时,其应力最高,为70.2 MPa,该值已超出涤纶材料的抗拉强度(57.3 MPa),在悬吊系统工作过程中,会导致中间平面结构破坏。因此,不能选择涤纶作为中间平面结构的制作材料。当中间平面结构的制作材料为PA6时,中间平面结构的最大应力约为38.29 MPa,远小于PA6的屈服强度(103.6 MPa)。因此,在悬吊系统工作过程中,中间平面结构既不会发生破坏,也不会产生永久变形。

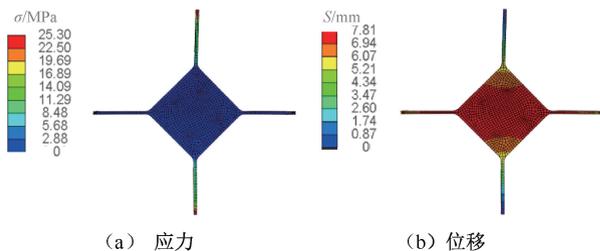


图5 中间平面结构仿真结果

Fig. 5 Simulation results of mid-plane structure (a) Stress, (b) Displacement

此外,就形变量而言,总体来看,组织的最大形变量均低于中间平面结构,表明在悬吊系统工作过

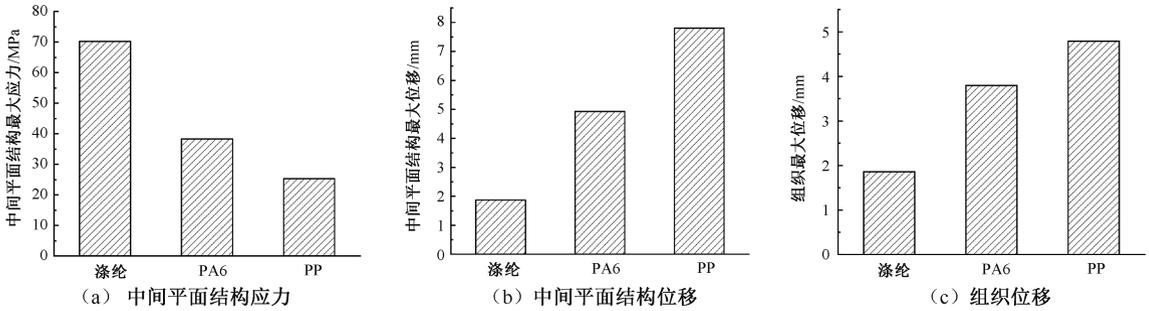


图 6 不同中间平面结构材料对各部分应力与位移的影响

Fig. 6 Influence of different mid-plane structural materials on the stress and deformation of each part (a) Stress in the middle plane structure, (b) Displacement of the intermediate plane structure, (c) Displacement of tissue

程中,中间平面结构易受压发生形变。并且当选用 PP 材料作为中间平面结构的制作材料时,所夹持组织和中间平面结构的形变量均最高,不利于临床手术的进行。而当中间平面结构的制作材料选用 PA6 时,其最大形变量仅为 4.9 mm,总体而言形变量较小,与 PP 材料相比,能够更好地实现悬吊腹腔内软组织的功能。综上所述,选用 PA6 作为中间平面结构的制作材料为最优。

3 讨论

临床上,许多微创手术,例如胆道旁通术、胆总管探查术、抗反流手术和脾切除术等,都需要使用各种腹腔镜牵引器,手术牵引过程中会造成肝脏、组织等不同程度的损伤,损伤程度大小取决于牵引器的结构和类型,以及手术中所需的牵引力^[22]。力控制不当会导致组织坏死、感染和瘢痕^[23]。因此,这种牵引的方式不但给医护人员带来手术操作的不便,而且会对患者造成不可避免的损伤。气腹机作为微创手术中常用的医疗设备,其作用是在腹腔内中建立手术操作空间。气腹机在使用过程中,气压性能的控制非常重要^[24]。气腹的腹内压力过高可引起心肺、神经、代谢紊乱、高碳酸血症和酸中毒等,低气压会造成手术视野暴露不够清晰等问题^[25-27]。虽然使用气腹装置是目前腹腔镜手术视野暴露的主要方法,但是在实际操作中,空间狭窄、组织掉落和器官阻挡视野等问题还是会加大手术操作难度。因此,本文利用现有条件,希望能够使用合理的方法最大限度地暴露手术空间,同时把对患者的损伤程度降到最低,提升手术的治疗效果,减少病人恢复周期。

本文利用现有的气腹装置,在低气压的前提下,设计了一款用于微创手术的新型悬吊系统,其作用是在腹腔镜手术中暴露更多视野,便于手术顺利进行。所设计悬吊系统中的中间平面结构,可用于托起腹腔内的各种软组织,从而不仅可以解决软组织遮挡医生手术操作视野的问题,而且还可有效提升手术操作空间,同时实现悬吊过程中对组织损伤的最小化。本文基于有限元仿真分析技术,研究不同夹子制作材料及不同中间平面结构制作材料对所设计悬吊系统使用效果的影响,并分析夹子对组织的夹持能力以及中间平面结构的承载能力。分析结果表明:

(1) 对于纯钛、钛合金 Ti6Al4V、钛合金 Ti6Al7Nb 和医用不锈钢 4 种夹子制作材料而言,从保护所夹持组织的角度出发,选择医用不锈钢作为夹子的制作材料为最佳。此外,4 种不同材料夹子在夹持组织过程中,组织的形变量均较低,不会出现所夹持组织从夹子中滑脱的现象,即夹子具有足够的夹持力。

(2) 对于涤纶、PA6、PP 3 种材料而言,当选取涤纶材料作为悬吊系统的中间平面结构的制作材料时,在悬吊系统工作过程中,中间平面结构会在外载荷作用下发生破坏,故不宜作为中间平面结构的制作材料。当选用 PP 材料作为中间平面结构的制作材料时,所夹持组织及中间平面结构的形变量均最高,不利于临床手术的进行,且中间平面结构会发生永久变形。因此,选择 PA6 作为中间平面结构的制作材料为最优。

本文利用有限元仿真分析技术,完成微创手术中悬吊系统的结构与材料设计,该悬吊系统的

有效性后续还需通过实验进一步验证。此外,在实际应用中,调整多大的气腹压力与该悬吊系统配合使用才能达到最佳的临床效果,也是有待于进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] LUKAS V, ALLEBLAS C, RHEMREV JP, et al. Human cadavers to evaluate prototypes of minimally invasive surgical instruments: A feasibility study [J]. *Technol Health Care*, 2017, 25(6): 1139-1146.
- [2] 颜青来,贾晓航,张沁园.气腹机性能检测中模拟腹腔的建立 [J]. *医疗装备*, 2010, 23(3): 1-2.
- [3] DAVARCI I, KARCIOĞLU M, TUZCU K, et al. Evidence for negative effects of elevated intra-abdominal pressure on pulmonary mechanics and oxidative stress [J]. *Sci World J*, 2015, DOI: 10.1155/2015/612642.
- [4] MEFTAHUZZAMAN SM, ISLAM MM, CHOWDHURY KK, et al. Haemodynamic and end tidal CO₂ changes during laparoscopic cholecystectomy under general anaesthesia [J]. *Mymensingh Med J*, 2013, 22(3): 473-477.
- [5] 闫鸿涛,李凯,庄晓晨.全身麻醉下妇科CO₂气腹与腹壁悬吊式无气腹腹腔镜手术对呼吸循环的影响 [J]. *中国现代药物应用*, 2012, 6(9): 49-50.
- [6] 朱荣荣.比较悬吊式与气腹式腹腔镜在妇科手术的护理配合 [J]. *安徽卫生职业技术学院学报*, 2010, 9(6): 59-60.
- [7] 付志本,宁继鹏,李恒平.悬吊式免气腹三孔腹腔镜胆囊切除术的应用体会 [J]. *腹腔镜外科杂志*, 2017, 22(3): 212-214.
- [8] VLOT J, WIJNEN R, STOLKER RJ, et al. Optimizing working space in porcine laparoscopy: CT measurement of the effects of intra-abdominal pressure [J]. *Surg Endosc*, 2013, 27(5): 1668-1673.
- [9] 屈栗明,张震波,熊贤明.免气腹腹腔镜手术治疗精索静脉曲张的临床效果 [J]. *临床医学研究与实践*, 2020, 5(6): 74-76.
- [10] PRYNDIUK S, BAYDO S, GRYGORENKO V. Comparative analysis of indexes of renal function in terms of carbon dioxide pneumoperitoneum, gas-free & low-gas laparoscopy [J]. *Eur Urology Suppl*, 2018, 17(14): e2929.
- [11] HU H, ZHANG K, ZHAO G, et al. Experimental use of a novel single-port gasless laparoendoscopic operative field formation device optimizing working space in porcine laparoscopy [J]. *Ann Med Surg*, 2017, 13: 13-19.
- [12] ZHANG G, LIU S, YU W, et al. Gasless laparoendoscopic single-site surgery with abdominal wall lift in general surgery: Initial experience [J]. *Surg Endosc*, 2011, 25(1): 298-304.
- [13] ÜLKERİ K, HÜSEYİNOĞLU Ü, KILIÇ N. Management of benign ovarian cysts by a novel, gasless, single-incision laparoscopic technique: Keyless abdominal rope-lifting surgery (KARS) [J]. *Surg Endosc*, 2013, 27(1): 189-198.
- [14] 郭润生,闫金龙,谢津璧,等.低气腹压辅助悬吊式腹腔镜在老年胆囊切除术中的应用研究 [J]. *中国微创外科杂志*, 2018, 18(6): 481-485.
- [15] 艾辽元,葛书晨,许晶晶,等.大肠组织端吻合的有限元建模与分析 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(4): 342-347.
- [16] AI LY, GE SC, XU JJ, et al. Finite element modeling and analysis on end-to-end anastomosis of the large intestine [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(4): 342-347.
- [17] 张奇超,张涛,文松青.基于有限元法分析Ti-6Al-4V合金的冲蚀行为 [J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(1): 33-37.
- [18] SHEN X, SHUKLAHUK P, NATH S, et al. Improvement in mechanical properties of titanium alloy (Ti-6Al-7Nb) subject to multiple laser shock peening [J]. *Surf Coat Tech*, 2017, 327: 101-109.
- [19] 王桂生,许国栋,魏寿庸,等.外科植入物用钛合金Ti-6Al-7Nb的研究 [J]. *稀有金属*, 2001, 25(5): 395-397.
- [20] 冯广智,付宏宇,马鹏华.三维有限元分析不同材料不同方法修复离体牙缺损模型的应力分布 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(6): 870-876.
- [21] OGDEN RW. Large deformation isotropic elasticity: On the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids [J]. *P Roy Soc A-Math Phys*, 1972, 326(1567): 565-584.
- [22] TRAN TN, NOVACEK 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.
- [23] FRANK T, SHIMI SM, WILLETS GT, et al. Atraumatic retractor for endoscopic surgery [J]. *Surg Endosc*, 1995, 9(7): 841-843.
- [24] WEE J, KANG M, FRANCIS P, et al. Novel force-sensing system for minimally invasive surgical instruments [J] // *Proceedings of 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Jeju: IEEE, 2017.
- [25] 杨文增,郭景阳.腹腔镜手术CO₂气腹对机体的影响 [J]. *医学研究与教育*, 2013, 30(3): 70-74.
- [26] 刘彦,侯庆香.二氧化碳气腹腹腔镜手术对人体腹膜形态学的影响 [J]. *中华医学杂志*, 2006, 86(3): 164-166.
- [27] YASHWASHII T, KAMAN L, KAJAL K, et al. Effects of low- and high-pressure carbon dioxide pneumoperitoneum on intracranial pressure during laparoscopic cholecystectomy [J]. *Surg Endosc*, 2020, 34(10): 4369-4373.
- [28] YU T, CHENG Y C, WANG X, et al. Gases for establishing pneumoperitoneum during laparoscopic abdominal surgery [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 6: CD009569.